www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

PHILIPS TECHNISCH TIJDSCHRIFT

JAARGANG 28, 1967, no. 8/9/10

Dit hele nummer is gewijd aan het werk van Mullard Research Laboratories, Redhill, Engeland. In een inleidend artikel schetst P. E. Trier, directeur van het laboratorium, de geschiedenis ervan en de belangrijkste tegenwoordige arbeidsgebieden. Daarna geeft een reeks artikelen van medewerkers van het laboratorium een beknopt overzicht van in de laatste tijd verrichte onderzoekingen, voor zover hierbij reeds een zekere afronding of duidelijk zichtbare resultaten zijn bereikt. Onderzoekingen waarbij dit nog niet het geval is, worden slechts kort aangestipt, ook al spelen sommige in het werkprogramma van het laboratorium een belangrijke rol.

De onderwerpen werden gekozen en de artikelen geschreven met de hulp van een hiertoe gevormde redactiecommissie onder leiding van prof. K. Hoselitz, onderdirecteur van het Mullard-laboratorium. Het is de redactie van dit tijdschrift een genoegen de medewerking van deze commissie te vermelden en aan de lezers deze interessante doorsnede van een industrieel researchprogramma in al zijn verscheidenheid voor te leggen.

Geschiedenis en functie van het Mullard researchlaboratorium

P. E. Trier

Historische inleiding

Aan het eind van de Tweede Wereldoorlog was de firma Mullard reeds een der belangrijkste fabrikanten van buizen en onderdelen voor de Britse elektronische industrie. Wijlen S. S. Eriks, de toenmalige directeur, voorzag duidelijk de grote uitbreiding en diversificatie die deze industrie te wachten stond, alsmede de nieuwe afzetmogelijkheden die hierdoor voor de fabrikanten van onderdelen zouden ontstaan. Hij begreep ook dat de Britse overheidslaboratoria een belangrijke rol zouden spelen in de ontwikkeling van nieuwe elektronische systemen, in het bijzonder voor defensie, telecommunicatie en kerntechniek. Door al deze nieuwe activiteiten moest voor de firma de behoefte ontstaan aan een organisatie die als technische tegenspeler kon fungeren en zodoende de firma op de hoogte kon houden van de nieuwe vereisten. Zulk een organisatie zou ook kunnen helpen een eigen beleid voor toekomstige produkten uit te stippelen, en de grondslagen te leggen voor samenwerking met de overheid aan geavanceerde projecten.

Met deze oogmerken werd in november 1946 het Mullard researchlaboratorium gesticht. Het werd ondergebracht in een kleine vleugel van een oude radiofabriek te Salfords bij Redhill (Surrey). In 1952 nam het reeds het hele oorspronkelijke gebouw in beslag en in 1954 werd op hetzelfde terrein begonnen met het optrekken van een nieuw gebouw. Sindsdien heeft het laboratorium zich voortdurend uitgebreid, door regelmatige toevoeging van nieuwe gebouwen en aankoop van aangrenzende terreinen. Het oorspronkelijke lage gebouw maakt nog steeds deel uit van de laboratoria: het herbergt de Afdeling Mechanische Research.

Het werk van het laboratorium was in het begin vooral gericht op nieuwe toepassingen van produkten van de firma, vooral voor televisie en voor militaire systemen. Men had zich van meet af aan gerealiseerd dat het laboratorium over behoorlijke constructie- en werkplaatsfaciliteiten moest beschikken, wilde men erin slagen resultaten van het laboratoriumonderzoek tot praktisch bruikbare prototypen te verwerken. Alleen al voor het onderzoek en de ontwikkeling van microgolfapparatuur waren een precisie-instrumentmakerij en de hulp van bekwame en speciaal geschoolde vaklieden onontbeerlijk. Een belangrijke verruiming van de mogelijkheden werd verkregen toen in 1948 het Special Vacuum Physics Laboratory uit de buizenfabriek te Mitcham naar het researchlaboratorium werd overgebracht: hierdoor konden microgolfbuizen, fotogeleiders en hoogvacuümtechniek in het werk worden betrokken.

Het laboratorium was nu in staat belangrijke nieuwe ontwikkelingstaken op zich te nemen en ook onderzoekwerk op geheel nieuwe gebieden aan te pakken. Nadat D. W. Fry experimenteel de mogelijkheid van een lineaire elektronenversneller had aangetoond [1] [*], werd het Mullard researchlaboratorium gevraagd de eerste praktisch bruikbare machines voor 4 MeV en 15 MeV te ontwerpen en te bouwen. Uit dezelfde

P. E. Trier, M.A., F.I.E.E., M.I.E.R.E., directeur research en ontwikkeling, Mullard Ltd.

[*] De noten vindt men aan het eind van het artikel.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

tijd dateert het pionierswerk dat door het laboratorium op het gebied van de ultrasone trillingen werd verricht; vele resultaten daarvan zijn thans in normale produkten verwerkt, maar ook nu nog wordt er enig onderzoek over de verwerking van ultrasone signalen gedaan [2].

De volgende stap ter uitbreiding van het werkgebied werd in 1952 gezet toen een Afdeling Vastestoffysica werd opgericht. Deze moest zich bezighouden met het onderzoek en de toepassing van de halfgeleiding, het ferrimagnetisme en het paramagnetisme — verschijnselen die toen reeds in de materialen en schakelingselementen voor elektronische toepassingen een rol begonnen te spelen. Het was het begin van het nieuwe tijdperk van de vastestofelektronica.

In het begin van de jaren vijftig was daarmee de opbouw van het laboratorium in grote trekken voltooid; de grondstructuur is sindsdien onveranderd gebleven. De werkzaamheden kunnen in drie categorieën worden verdeeld: fundamenteel onderzoek van de fysische verschijnselen die ten grondslag liggen aan het gedrag van elektronische materialen en schakelingselementen; het zoeken naar nieuwe schakelingselementen en het ontwikkelen van technieken voor hun vervaardiging; en de toepassing van deze elementen in nieuwe apparaten en systemen. Hoewel de organisatie van het laboratorium gebaseerd is op het bestaan van onafhankelijke afdelingen met afgebakende werkgebieden, ligt het in de aard van het tegenwoordige werk dat in elke afdeling, bij de ene meer, de andere minder, dingen gedaan worden die in alle drie genoemde categorieën vallen, en dat voor vele projecten een organisatie en werkverdeling nodig is die dwars door de afdelingsgrenzen heenloopt.

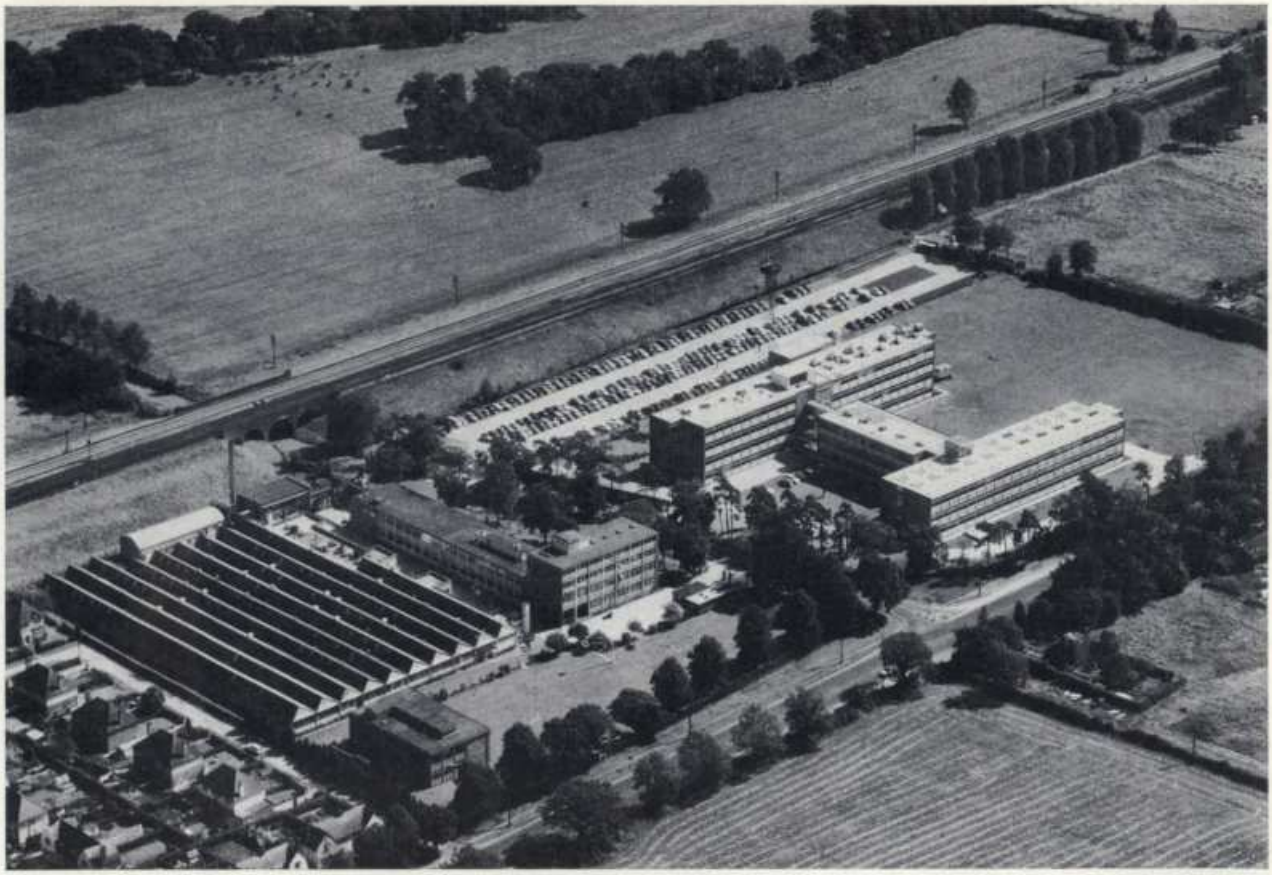
Ondanks de continuïteit die in het werkprogramma van de laatste vijftien jaren te zien valt, zijn er vele veranderingen geweest in de keuze of de prioriteit van de onderwerpen, en ook in de personen en de betrekkingen met instanties buiten het laboratorium. Aan het begin van deze periode was een groot gedeelte van het werk gericht op de ontwikkeling van schakelingselementen en apparaten die direct in een der fabrieken van de firma of elders in produktie zouden kunnen worden genomen. De nadruk lag veel meer op het verbeteren van bestaande dingen dan op het brengen van nieuwe. Onder hoogspanning moest soms worden gewerkt om speciale produkten te ontwikkelen waarvoor de ontwikkelingslaboratoria van de fabrieken niet waren ingericht en die derhalve aan Salfords werden toevertrouwd; soms werden de eerste series zelfs hier gefabriceerd. Men had echter steeds ingezien dat de definitieve ontwikkeling van nieuwe produkten het best in de fabrieken zelf kon gebeuren; men zou dan zeker zijn dat een ontwerp zou passen bij de fabricagemethodes, bij zo laag mogelijke kostprijs. Vele projecten werden derhalve geleidelijk naar de groeiende fabrieckslaboratoria overgeheveld, en vaak gebeurde dit zo dat volledige werkgroepen van het researchlaboratorium met hun werk naar de fabrieken werden overgebracht, hetzij om een bestaand ontwikkelingslaboratorium te versterken, hetzij om de kern van een nieuw ontwikkelingslaboratorium te vormen. Op deze wijze hebben groepen van het researchlaboratorium geholpen om in de fabrieken ontwikkelingslaboratoria te stichten voor halfgeleiders, microgolfbuizen, geheugens voor rekenmachines en elektronische systemen; ook het Centraal Applicatielaboratorium van Mullard te Mitcham is op deze wijze ontstaan. Bovendien zijn vele medewerkers individueel overgeplaatst.

Door deze verschuivingen kon het researchlaboratorium zich meer concentreren op nieuwe principes, nieuwe ideeën voor schakelingselementen en nieuwe vormen van systemen; dit ging gepaard met een verbetering en vernieuwing der gebruikte technieken. Deze toenemende nadruk op werkelijk nieuwe dingen was alleen mogelijk door een geleidelijke groei van de medewerkers in wetenschappelijke bekwaamheid en technische ervaring en ook in aanpassingsvermogen bij het ter hand nemen van een nieuwe taak. Deze groei is gepaard gegaan met een steeds intensiever contact en samenwerking met Philips' Natuurkundig Laboratorium te Eindhoven en hiermee verbonden laboratoria elders in West-Europa. Tegelijkertijd heeft de samenwerking met de Britse overheidslaboratoria, die van het begin af aan belangrijk is geweest, zich uitgebreid en verdiept; ook wordt er in toenemende mate contact onderhouden met universiteiten en technische hogescholen.

Door de snelle groei van het laboratorium werd begin 1956 een personeelsbezetting van bijna 700 bereikt. We hadden toen met ernstig plaatsgebrek te kampen. De verdere groei is sindsdien afgeremd; de toestroming van jonge krachten is mogelijk gemaakt door telkens medewerkers in groepen of individueel over te plaatsen, zoals boven reeds vermeld. De bezetting bedraagt nu 600 à 650. Hiervan zijn 200 afgestudeerden van universiteiten, en er zijn nog een zestigtal die hiermee kunnen worden gelijkgesteld. De totale beschikbare ruimte, die in het begin (1946/47) ca. 1000 m² bedroeg, was in 1952 toegenomen tot 5000 m², nl. de gehele oorspronkelijke laagbouw. Door de geleidelijke uitbreiding sinds 1954, inclusief de ingebruikneming van het nieuwste gebouw in 1966, is de totale ruimte thans op 18000 m² gebracht. Dit is voldoende voor de omvang en de aard van het werk dat we nu doen. De ligging van het laboratorium in een ten dele nog landelijke omgeving, maar met goede verbindingen met Londen en met de fabrieken van de firma in het zuiden van Engeland, is zeer gunstig gebleken.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



Het Mullard researchlaboratorium te Redhill, Engeland. Het Laboratorium ligt aan de spoorlijn van Londen naar Brighton.

Het tegenwoordige programma

De organisatie van het laboratorium omvat vier researchafdelingen, nl. de Afdelingen Vastestoffysica, Vacuümfysica, Elektronische schakelingen en Systemen. De Afdelingen worden ter zijde gestaan door een aantal centrale technische diensten, die voor alle Afdelingen werken. De grootste hiervan is de constructieafdeling; deze omvat ontwerp- en constructiebureaus, mechanische, elektrotechnische, chemische en fotografische werkplaatsen. Verder staan ter beschikking faciliteiten voor rekenwerk, een optisch laboratorium, een glasblazerij, een instrumentendienst, een bibliotheek en een documentatiedienst, zomede de normale administratieve en andere diensten die voor het functioneren van een zelfstandig instituut nodig zijn.

Om het werkprogramma en de doelstellingen en begrenzing van de gekozen projecten te begrijpen, moet men rekening houden met een aantal factoren. In de eerste plaats moet de taak van het laboratorium worden gezien in het kader van een elektronische industrie die onderdelen en deelsystemen vervaardigt; er valt derhalve, zoals reeds gezegd, een algemene nadruk op de fysica van elektronische onderdelen, op de hiervoor nodige materialen, op de elektrische eigenschappen van de onderdelen en van hieruit opgebouwde deelsystemen, en op de technieken voor hun vervaardiging. Reeds in het begin was het desalniettemin duidelijk dat men, om tot bruikbare nieuwe onderdelen te komen, zich ook grondig moet bezighouden met hun toepassing in schakelingen en in volledige systemen. Alleen hierdoor wordt de voortdurende wisselwerking tussen de leverancier van de onderdelen en de apparatenontwerper mogelijk die in ons werkgebied een levensbelang is: de mogelijkheden van nieuwe onderdelen geven het aanzijn aan nieuwe toepassingen, en omgekeerd geven nieuwe eisen die de gebruiker stelt een richtsnoer voor het vinden en ontwikkelen van onderdelen. Voor de thans in opkomst zijnde geïntegreerde schakelingen met halfgeleiders, en de te verwachten stap naar integratie op grote schaal, zijn deze opmerkingen bijna triviaal, maar het gestelde was reeds lang voordien tot op grote hoogte van kracht. In het laboratorium is derhalve voortdurend veel werk gedaan aan elektronische schakelingen en systemen. Op het gebied van de elektronica voor toonbankprodukten, vooral televisie, hebben we dit zelfstandig kunnen doen; door het intensieve op de applicatie gerichte onderzoek konden we een omvangrijke kennis van alle aspecten van de ontvangertechniek

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

verwerven. Hierdoor hebben we de apparatenfabrikanten die onderdelen van onze firma betrekken, kunnen helpen hun ontwerpen te vereenvoudigen, en tevens heeft het onze firma zelf in staat gesteld typereeksen van oscilloscoopbuizen, ontvangbuizen, halfgeleiderelementen, afbuigspoelen en andere onderdelen te normaliseren. Op het gebied van de professionele elektronica, die de telecommunicatie, defensiesystemen, regelinstallaties, elektronische rekenmachines enz. omvat, is het te enen male onmogelijk zulk een uitgebreid op de applicatie gericht onderzoek op te zetten als men niet ten nauwste met bepaalde gebruikers samenwerkt. In dit verband zijn de onderzoekingen over elementen en systemen die op grond van research- of ontwikkelingscontracten ten behoeve van overheidslaboratoria worden verricht, buitengewoon waardevol: ze geven ons de contacten met de gebruiker en ze maken ons vertrouwd met de meest geavanceerde eisen waaraan men door nieuwe technieken of door een nieuwe aanpak moet trachten te voldoen. In de laatste jaren is de Britse overheid zich ook voor de civiele elektronica gaan interesseren en dit heeft geleid tot het op stapel zetten van researchprojecten met een nieuw soort samenwerking, nl. tussen enerzijds de overheid en anderzijds verschillende industriële firma's. Het leiding geven aan zulke projecten kan zeer moeilijke problemen met zich meebrengen, maar het streven om de ontwerpers van onderdelen en apparatuur tot nauwe samenwerking te brengen, kan niet anders dan zeer waardevolle vruchten afwerpen.

De Afdeling Systemen van het laboratorium doet ook sinds vele jaren werk aan installaties ten behoeve van de M.E.L. Equipment Co. Ltd., een met ons samenwerkende onderneming die in de loop der tijden vele geavanceerde ontwikkelingsprojecten heeft overgenomen voor definitieve uitwerking en produktie.

Een andere belangrijke factor bij het vaststellen van details van het programma, is de toenemende samenwerking met Philips' Natuurkundig Laboratorium te Eindhoven. Weliswaar zijn er in het Mullard-laboratorium een aantal projecten in bewerking waarvoor wegens de koppeling met de belangen van derden, op commerciële of andere gronden, geheimhouding is verplicht en waarover dus een vrije uitwisseling van informatie met het Philipslaboratorium niet mogelijk is. Zulke projecten zijn echter in de minderheid. In de meeste gevallen waar het om fundamentele onderzoekingen over nieuwe fysische principes of technieken voor schakelingselementen gaat, is een wederzijdse informatie en een uitwisseling van inzicht mogelijk en nuttig. Er zijn op zijn minst twee belangrijke voordelen die dit contact met zich meebrengt: ten eerste kan elk laboratorium profiteren van de ervaring van het andere en daardoor veel tijd besparen, vooral bij het zich eigen maken van het hanteren van nieuwe materialen; ten tweede kan men arbeidsgebieden onder elkaar verdelen en derhalve doublures vermijden, die vooral in het geval van „wilde" projecten, waarvan het uiteindelijke succes en de industriële realiseerbaarheid twijfelachtig zijn, een grote verspilling zouden betekenen. Om maar een voorbeeld te noemen: aan masers wordt uitsluitend in dit laboratorium gewerkt, terwijl het werk over nieuwe lasers vrijwel uitsluitend door het Philipslaboratorium te Eindhoven wordt gedaan.

Ten slotte zij erop gewezen dat de medewerkers van ons laboratorium het altijd als een voorrecht beschouwen op internationaal niveau van gedachten te kunnen wisselen met andere onderzoekers.

Enkele grepen uit ons werk

In de artikelen in dit nummer worden een aantal onderwerpen behandeld waaraan we tegenwoordig werken. Ter completering van het beeld volgen hier enkele opmerkingen over het werk van de verschillende Afdelingen en over enkele projecten die in de artikelen niet ter sprake komen.

De Afdeling *Vastestoffysica* houdt zich in hoofdzaak bezig met halfgeleiderfysica, halfgeleideronderdelen, magnetische verschijnselen [3] en quantumelektronica. Ten dienste van deze groep zijn er faciliteiten voor metallurgisch onderzoek, chemische analyse, kristalgroei, bereiding van allerlei materialen, en er is ook een groep voor theoretische fysica en toegepaste wiskunde. Een der hoogtepunten van het werk van deze afdeling is de realisering van de lopendegolfmaser geweest [4]; dit succes konden we vrijwel tegelijk met de hieraan werkende onderzoekers in de Verenigde Staten boeken. Sindsdien zijn in ons laboratorium, hoofdzakelijk in de Afdeling Systemen, een aantal maserinstallaties voor ontvangers met zeer laag ruisniveau ontworpen en uitgevoerd. Twee van deze masers doen nu dienst voor transatlantische telefonie in het grondstation dat in Cornwall gebouwd is voor de Intelsat I satelliet (Early Bird). Voorts wordt er onderzoek verricht over mogelijke nieuwe masermaterialen [5].

Op halfgeleidergebied wordt op het ogenblik zeer intensief gewerkt aan een project van *ver doorgevoerde integratie op basis van de MOST* (Metal Oxide Semiconductor Transistor). Als taak voor dit project, waaraan alle afdelingen bijdragen, is gesteld de vervaardiging van een snel rekenmachinegeheugen met MOST-combinaties. De bedoeling is dat een groot gedeelte van zo'n geheugen (b.v. 1000 bits) op één siliciumplaatje wordt ondergebracht. Er wordt nu gewerkt aan technieken om met een hoge opbrengst MOST-eenheden met *P*-kanaal voor één bit informatie te maken, en om de geschikte verbindingen tussen deze eenheden uit te laten zoeken door een machine die bestuurd wordt door

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

een rekenmachine en automatisch de nodige maskers maakt. Hiertoe is een geautomatiseerde controlemethode voor de eenheden ontwikkeld, waarbij een rekenmachine de fouten analyseert; de resultaten hiervan zullen worden vergeleken met optisch en infraroodonderzoek van de plaatjes, om de oorzaken van de fouten op te sporen. Parallel hiermee, en met de bijbehorende technologische onderzoekingen [6] [7], worden selectieschakelingen ontworpen die geschikt zijn voor integratie. Ook de mogelijkheden om zeer snelle geheugens langs deze weg te maken worden onderzocht.

Een nieuw halfgeleiderschakelingselement waaraan wij nu werken, is de optisch gekoppelde transistor. Het principe van deze transistor is onafhankelijk door ons laboratorium [8] en door I.B.M. [9] voorgesteld. Hij lijkt op de normale transistor, maar zijn werking berust niet op de diffusie van minderheidsladingdragers doch op de doorlating van fotonen door de basis.

De essentiële bestanddelen van de optisch gekoppelde transistor zijn: een elektroluminescerende diode als emissor; en de een of andere fotodetector als collector. Doordat dit element met fotonen werkt, mag het voor een zelfde frequentie een veel dikkere basis hebben dan een normale transistor, zodat de basisweerstand lager wordt. Het element lijkt derhalve veelbelovend als microgolfversterker.

De problemen die aan de realisering van dit element vastzitten, zijn in hoofdzaak het ontwikkelen van elektroluminescerende diodes en van snelle en efficiënte collectors. Ons werk is gebaseerd op het gebruik van GaAs en daarvan afgeleide materialen (GaInAs, GaAsP) voor emissor, basis en collector. De thans vervaardigde elementen zijn nog niet geschikt voor microgolffrequenties, maar de resultaten zijn bemoedigend genoeg om het werk voort te zetten.

De Afdeling *Vacuümfysica* bevat groepen die werken aan elektronenemissie, elektronenoptica, beeldbuizen, hoogvacuüm, gasontladingen, microgolfbuizen en het gebruik van de elektronenbundel als technologisch werktuig [10]. De activiteit op het gebied van microgolfbuizen is geleidelijk verminderd door het overhevelen van werk naar de fabriekslaboratoria. Het belangrijkste onderwerp waarop de afdeling zich nu concentreert, is de „donkerkijker", voor het *zien bij nacht*, en de daarmee verwante afbeeldingsinrichtingen zoals de beeldtransformator [11] en de elektronenmultiplicatorpijp [12], die in dit nummer worden behandeld.

In de afgelopen tien jaren heeft een groep in dit laboratorium een aantal belangrijke verbeteringen in de hulpmiddelen voor het zien bij nacht weten te realiseren [13]. Aan de zuiver passieve optische instrumenten moeten actieve elementen worden toegevoegd, die een helderheidsversterking teweeg kunnen brengen. Deze inrichtingen, de beeldversterkers, moeten foto-elektrisch werkzame oppervlakken hebben die op zijn minst even gevoelig zijn als het menselijk oog, en die zo geconstrueerd zijn dat ieder uitgezonden fotoelektron bijdraagt tot de waarneming door het oog.

De onderzoekingen hebben tot een reeks nieuwe beeldversterkers geleid en ook tot belangrijke vindingen in de elektronenoptica. Een voorbeeld hiervan is een elektrostatisch „Zoom"-systeem, waarbij de vergroting gevarieerd kan worden in de verhouding 4 : 1. Er kunnen thans buizen met vezeloptiekvensters worden gemaakt waarbij het resulterende scheidend vermogen alleen bepaald wordt door de eigenschappen van de vensters en het fluorescerende scherm. Voortgezette technologische studies over het scherm openen vooruitzichten op een groter scheidend vermogen zonder vermindering van het lichtrendement.

Men mag zich niet ontveinzen dat methodes ter verbetering van de gezichtsscherpte bij lage verlichtingsniveaus ook van militaire betekenis zijn. We hebben zeer veel werk aan dit aspect besteed. Het tegenwoordige onderzoek over elektronenmultiplicatie in pijpen doet echter een reeks van mogelijke toepassingen voor niet-militaire doeleinden voorzien. Zo zal misschien televisie bij zeer lage lichtniveaus mogelijk worden.

De Afdeling *Elektronische Schakelingen* heeft tot voor kort zeer veel werk verricht aan toepassingen voor televisiesystemen en televisieontvangers. Een groot deel van dit werk is nu overgenomen door het Centraal Applicatielaboratorium te Mitcham, maar de Afdeling doet nog wel wat geavanceerd werk aan ontvangers en aan weergeeftechnieken, ten dele in verband met televisie, ten dele voor andere toepassingen. Het onderzoek van nieuwe mogelijkheden voor kleurenweergave is nog steeds belangrijk; ook wordt er zeer veel aandacht besteed aan geïntegreerde schakelingen voor lineaire toepassingen. Op professioneel gebied werkt een groep aan elektronische hulpmiddelen voor de auto [14] en een andere groep aan de toepassing van ferrieten [15]; deze onderwerpen zijn beide door artikelen in dit nummer vertegenwoordigd. Het meeste werk op het gebied van de professionele elektronica gebeurt echter in een aantal groepen die zich bezighouden met schakelingen voor rekenmachines.

Op het laatstgenoemde gebied is het belangrijkste onderwerp dat van het *geheugen van magnetische dunne laagjes* [16]. In 1957/58 zijn wij met onderzoekingen over de magnetisatieprocessen begonnen. Een diepgaande studie was gewijd aan de mechanismen van de omkering van de magnetisatie. Deze studie leverde belangrijke bijdragen tot het inzicht in de geïnduceerde eenassige anisotropie, het ontstaan van kiemen van Weiss-gebieden met tegengestelde richting, de rol van de demping bij de omkering door draaiing, kruipverschijnselen, de spreiding van de anisotropie naar

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

grootte en richting en het verband hiervan met een rimpel in de magnetisatie. Het voorstel om uit dunne laagjes bestaande elementen te gebruiken voor een snel rekenmachinegeheugen, kwam terwijl wij met het onderzoek van de materialen en de omkeerprocessen bezig waren, en dit leidde tot de ontwikkeling van een experimenteel geheugen van 2560 bits (64 woorden van 40 bits) met een cyclustijd van ongeveer 200 ns. Hiermee was de principiële mogelijkheid aangetoond om de techniek van de dunne magnetische laagjes voor snelle en zeer snelle geheugens toe te passen; men kon zich nu realiseren welke schakelingsproblemen aan deze techniek vastzaten en men kon deze problemen aanpakken. Op het ogenblik wordt een prototype van een geheugen van ongeveer 10^6 bits gebouwd om de fabricagemethodes uit te werken en de maximale grootte en snelheid van dergelijke geheugens vast te stellen. De resultaten wijzen erop dat geheugens van dunne magnetische laagjes als centrale geheugens voor rekenmachines in gebruik zullen komen, speciaal wanneer men hiervoor kortere cyclustijden zal gaan vragen dan de kerntjesgeheugens bezitten.

De Afdeling *Systemen* werkt op verschillende gebieden. Genoemd zij eerst het microgolfgebied, waar aandacht wordt besteed aan speciale onderdelen en deelsystemen zoals halfgeleideronderdelen, passieve onderdelen voor grote bandbreedte, masers, alsook aan complete microgolfsystemen. Verder zijn er groepen voor signaalverwerking (waartoe te rekenen het automatisch lezen van geschreven letters en cijfers [17]), voor industriële meet- en regelsystemen, een nieuwe groep voor gaschromatografie en een groep die het oude werk over deeltjesversnellers voortzet. Enige typische doelstellingen van de Afdeling Systemen zijn boven reeds genoemd, en verschillende onderwerpen zullen in de volgende artikelen worden behandeld, maar twee gebieden mogen hier nog naar voren worden gebracht: vastestofonderdelen voor microgolven, en microgolfontvangers met grote bandbreedte. Voor de eerstgenoemde is een omvangrijk programma van onderzoek en ontwikkeling opgesteld; de aandacht is daarbij vooral gericht op parametrische versterkers. Wat de laatstgenoemde betreft: we hebben reeds gewezen op het belangrijke werk dat aan de vastestofmasers is gedaan, en dat thans min of meer afloopt. Na de successen die behaald zijn met het ontwerp van masers voor de frequentiegebieden van 3 GHz en 9 GHz, is nu aanzienlijke vooruitgang geboekt met masers voor het frequentiegebied van 30 GHz, en we hebben kunnen aantonen dat een maser met redelijke versterking voor een bandbreedte van 20 MHz kan worden geconstrueerd.

We hebben verschillende nieuwe bronnen voor het opwekken van microgolven ontwikkeld, waaronder een betrekkelijk goedkope en eenvoudige bron die een vermogen van 10 mW levert en die gebruik maakt van een Boff-diode gestuurd door een hoogfrequentietransistor van 100 mW. Een andere vastestofbron, voor 50 mW bij 30 GHz, bestaat uit een transistoroscillator voor 500 MHz (2 W) waarop drie frequentieverviervoudigingstrappen in cascade zijn aangesloten; deze bron is geschikt als lokale oscillator voor een ontvanger of als pomp voor een parametrische versterker.

Als onderdeel voor microgolfstraalverbindingen is ontwikkeld een afstembare tunneldiodeversterker voor 10,7-11,7 GHz met 100 MHz momentele bandbreedte bij 15 dB versterking en een ruisgetal van slechts 6 dB.

Zeer veel aandacht wordt besteed aan onderzoek en ontwikkeling van parametrische versterkers met varactordiodes. Deze versterkers worden nader beschreven in een artikel in dit nummer [18].

Naar onze mening zullen deze microgolfelementen op den duur de microgolfbuizen voor kleine en gemiddelde vermogens in vele toepassingen verdringen.

Een gebied waarop een groep van het Mullard-laboratorium heel bijzondere bijdragen tot ons technisch kunnen heeft geleverd, is dat van de bredebandmicrogolfontvangers [19]. Gedurende vele jaren hebben wij in opdracht van de Britse regering en ten behoeve van de firma de techniek van microgolfontvangers bestudeerd. Het hoofdthema van dit werk was het zoeken naar nieuwe ontvangersystemen voor het detecteren en meten van signalen in frequentiebanden van meer dan 1 octaaf. Met hulpmiddelen zoals de microgolffazediscriminator en het homoheterodyne-principe hebben we uiterst gevoelige ontvangers geconstrueerd die kunnen werken zonder afstemming en waarmee bepaalde signaaleigenschappen zoals de frequentie en de hoek van de invalsrichting automatisch worden gemeten. Hierbij zijn speciale microgolfonderdelen nodig [20], en de nauwe samenwerking tussen de ontwerpers van deze onderdelen en de instanties die de techniek van de informatieverwerking en de bestudering van het complete systeem voor hun rekening nemen, is het werk zeer ten goede gekomen. Zo hebben wij door toepassing van digitale methodes voor de meting van microgolven een leidende plaats in de wereld kunnen veroveren met een apparatuur voor het bepalen van richting en frequentie [21]; enkele van de vroegere ontwikkelingen hebben reeds geleid tot een vrij omvangrijke fabricage van dergelijke apparaten.

Slotopmerkingen

Het streven van een industrieel researchlaboratorium is uiteraard gericht op vernieuwing: de firma moet in staat worden gesteld met haar produktie telkens weer nieuwe gebieden te betreden en tot nieuwe werkwijzen over te gaan. Om aldus de weg voor het nieuwe te bereiden, is het inzicht in de grondslagen even be-

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

langrijk als grote experimentele bekwaamheid; en hoewel de belangstelling van de medewerkers van het laboratorium altijd uit zal gaan naar nieuwe onderwerpen waarvan het belang eventueel nog onzeker is, moeten zij toch ook op zich nemen om dingen die bruikbaar lijken ook inderdaad tot een bruikbaar stadium te brengen, waar de ontwikkelingslaboratoria met redelijke zekerheid van succes het werk kunnen overnemen. Even belangrijk is ook de geschikte keuze van onderwerpen en de communicatie van voortgang en resultaten; dit vereist een voortdurend contact met partners van het laboratorium in de Industriegroepen van de firma, met laboratoria van universiteiten, van overheidsinstellingen, van samenwerkende en andere firma's. Het is van ouds het streven van het Mullard-laboratorium deze contacten te bevorderen en ze nuttig aan te wenden om de doelstellingen en de actualiteit van het werkprogramma te toetsen. In laatste instantie echter kan geen uitwendige controle de vaste wil vervangen die in het laboratorium moet bestaan om onze slagvaardigheid, onze visie en de kwaliteit van ons werk op te voeren.

Literatuur

[1] D. W. Fry, De lineaire elektronenversneller, Philips techn. T. **14**, 225-237, 1952. C. F. Bareford en M. G. Kelliher, Een lineaire elektronenversneller voor 15 miljoen elektronvolt, Philips techn. T. **15**, 177-205, 1953.

[2] J. S. Palfreeman, blz. 318 van dit nummer.

[3] F. W. Harrison, R. F. Pearson en K. Tweedale, blz. 235 van dit nummer.

[4] J. C. Walling, Travelling wave masers, Solid-State Electronics **4**, 225-234, 1962. J. C. Walling, Travelling wave masers, 5th AGARD Avionic Panel Conf. Oslo 1961, herdrukt in Low Noise Electronics, 225-235, 1962. J. C. Walling en F. W. Smith, A travelling wave maser for satellite communication systems, Quantum Electronics **III-1**, 923-930, 1963. J. C. Walling en F. W. Smith, De vastestofmaser; principe en toepassing in de communicatie via satellieten, Philips techn. T. **26**, 33-54, 1964/65.

[5] J. W. Orton, D. H. Paxman en J. C. Walling, blz. 246.

[6] A. F. Beer, J. B. Coughlin en P. J. Daniel, blz. 253.

[7] K. H. Nicholas, blz. 249.

[8] J. R. A. Beale en P. C. Newman, Britse octrooiaanvrage 48360/62.

[9] R. S. Rutz, Proc. IEEE **51**, 470, 1963.

[10] H. N. G. King, blz. 272; I. H. Lewin, blz. 275.

[11] P. Schagen en A. W. Woodhead, blz. 262.

[12] J. Adams en B. W. Manley, blz. 256.

[13] P. Schagen, D. G. Taylor en A. W. Woodhead, An image intensifier system for direct observation at very low light levels, Adv. in Electronics and Electron Physics **16**, 75-84, 1962. P. Schagen, D. G. Taylor en A. W. Woodhead, A two-stage electrostatic image intensifier with a large photocathode area, Adv. in Electronics and Electron Physics **16**, 105-112, 1962. P. Schagen, Electronic aids to night vision, Television Soc. J. **10**, 218-228, 1963. A. W. Woodhead, D. G. Taylor en P. Schagen. Een experimentele beeldversterkerbuis met elektrostatische „Zoom"-optiek, Philips techn. T. **25**, 254-261, 1963.

[14] R. W. Lindop, blz. 279.

[15] C. V. Newcomb en E. C. Snelling, blz. 284.

[16] R. V. Peacock, blz. 288.

[17] P. Saraga, J. A. Weaver en D. J. Woollons, blz. 297.

[18] C. S. Aitchison, blz. 304.

[19] A. J. Lambell, A tapped delay line compression network for linear F.M. signals, Conference on delay devices for pulse compression radar, IEE Conference publication No. 20, februari 1966.

[20] S. J. Robinson en P. T. Saaler, blz. 312.

[21] R. N. Alcock, blz. 327.

Samenvatting. Het artikel vormt een inleiding voor dit nummer, dat geheel aan het Mullard researchlaboratorium is gewijd. De geschiedenis van het ontstaan en de groei van het laboratorium wordt beschreven en het programma wordt globaal geschetst. Iets nader wordt ingegaan op de verschillende functies die het laboratorium tegenwoordig heeft, op het verband met de industriële activiteiten van de firma Mullard en ook op het verband met wetenschappelijke en technische activiteiten buiten de firma, vooral onder auspiciën van de Britse regering. Het artikel besluit met een opsomming van een aantal speciale onderwerpen waaraan in het laboratorium wordt gewerkt, waaronder ook sommige die niet in de volgende reeks van artikelen worden behandeld.

Onderzoek aan monokristallen van ferrieten en granaten

F. W. Harrison, R. F. Pearson en K. Tweedale

In 1954 werd besloten in het programma van de nieuwe afdeling Vastestoffysica van het Mullard-laboratorium, naast het reeds begonnen werk aan halfgeleiders, ook een onderzoek aan magnetische materialen op te nemen.

Ferrieten zijn oxidische materialen die, door hun uitgesproken magnetische eigenschappen gecombineerd met een hoge elektrische weerstand, een belangrijke plaats innemen in de elektronische industrie. Zij zijn in hoofdzaak uitgevonden en ontwikkeld door J. L. Snoek in Philips' Natuurkundig Laboratorium te Eindhoven in de jaren rondom 1940. In 1954 bestond er reeds sedert enige jaren een produktie van ferriet-onderdelen, en werden de ferrieten al op menige, aanvankelijk onvermoede, wijze toegepast.

Het in Eindhoven begonnen werk was gevolgd door een uitgebreid onderzoek van de eigenschappen van de nieuwe materialen, maar er bleef nog een aantal fundamentele verschijnselen onverklaard. Deze zouden het best kunnen worden bestudeerd aan monokristallijn materiaal in plaats van aan de polykristallijne keramische handelsprodukten. In de verwachting dat het Mullard-laboratorium hier een bijdrage zou kunnen

F. W. Harrison, Ph.D., R. F. Pearson, Ph.D., en K. Tweedale, B.A., medewerkers van Mullard Research Laboratories, Redhill (Surrey), Engeland.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

leveren, werd een werkgroep voor dit gebied samengesteld.

De vervaardiging van monokristallen

Monokristallen vormden een eerste vereiste voor de uitvoering van het programma. Deze werden aanvankelijk vervaardigd volgens de vlam-smeltmethode van Verneuil (*fig. 1*). Met een verticaal gerichte zuurstof-lichtgas- of zuurstof-waterstofvlam wordt een temperatuur van meer dan 1500 °C geproduceerd om het poedervormige uitgangsmateriaal te smelten. Het poeder valt door de vlam en het materiaal kristalliseert op een vuurvast voetstuk in de punt van de vlam. De kristallisatie schrijdt voort terwijl men het voetstuk regelmatig laat zakken om de punt van het aangroeiende kristal op dezelfde plaats in de vlam te houden. Op deze wijze wordt een monokristallijne pegel opgebouwd. Deze methode is toegepast voor het maken van

Fig. 1. Het vlam-smeltapparaat dat werd gebruikt bij de vervaardiging van monokristallen van mangaanferriet en soortgelijke verbindingen. In de trechtervormige schudder bevindt zich een trillende bus die een regelbare hoeveelheid poeder aan de verticale brander toevoert. Het mondstuk van de brander is boven in de oven van vuurvaste steen gericht, waarbinnen het kristal groeit.

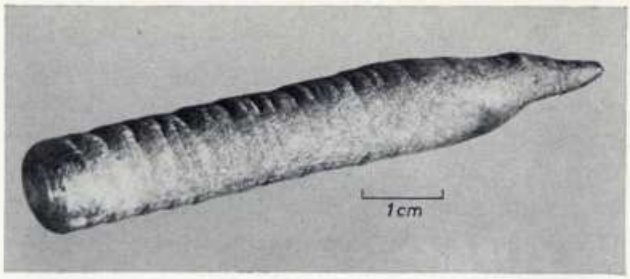


Fig. 2. Een pegel van mangaanferriet, vervaardigd volgens de vlamsmeltmethode. De groei laat men met een dunne hals beginnen om de kans dat meer dan één kiem uitgroeit, te verkleinen. Onregelmatigheden op het oppervlak zijn het gevolg van variaties in de toevoer van poeder, de omstandigheden in de vlam en de snelheid waarmee men het kristal laat zakken.

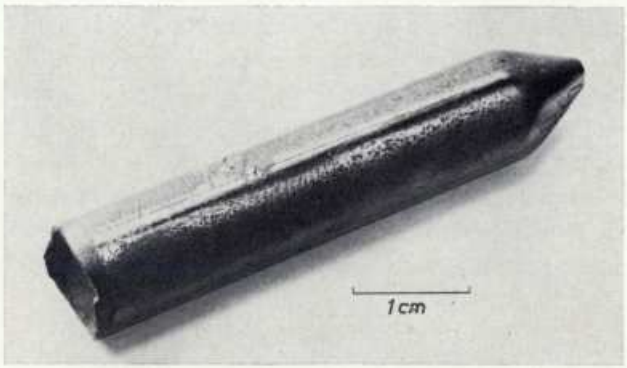


Fig. 3. Een magnetietkristal, gekweekt volgens de methode van Bridgman. De platina-rodiumkroes waarin de kristalgroei vanuit de smelt plaatsvond, is verwijderd. Het puntige einde is het beginpunt van de kristalgroei. Aan het andere eind is het oppervlak van het kristal bij het afkoelen vanaf het smeltpunt aan de ovenatmosfeer blootgesteld geweest en daarbij licht geoxideerd.

mangaanferriet (*fig. 2*) en een reeks daarvan afgeleide samenstellingen waarin extramangaan, extra-ijzer of kobalt is gesubstitueerd.

Volgens de methode van Bridgman laat men een kroes met spitse bodem, waarin zich het gesmolten materiaal bevindt, langzaam door een temperatuurgradiënt in een verticale elektrische oven zakken, zodat de kristallisatie in de bodempunt begint. Op deze wijze werden magnetiet- en ferroferrietkristallen gemaakt, alsmede gallium of aluminium bevattend magnetiet (*fig. 3*). Met het oog op het grote gehalte aan ferroionen was bij al deze stoffen voor het tot stand komen van chemisch evenwicht bij het smeltpunt een atmosfeer van kooldioxide vereist. De kroezen waren gemaakt van een platina-rodiumlegering.

De groeiende belangstelling voor magnetische materialen met granaatstructuur, b.v. $R_3^{3+}Fe_5^{3+}O_{12}$ (waarin R een zeldzaam aardmetaal is of yttrium), was aanleiding om over te gaan tot het kweken van kristallen uit een oplossing. Deze van de Bell Laboratories afkomstige methode is bijzonder geschikt voor dergelijke verbindingen. Door een oplossing met loodoxide of loodoxide-loodfluoride als oplosmiddel langzaam af te

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

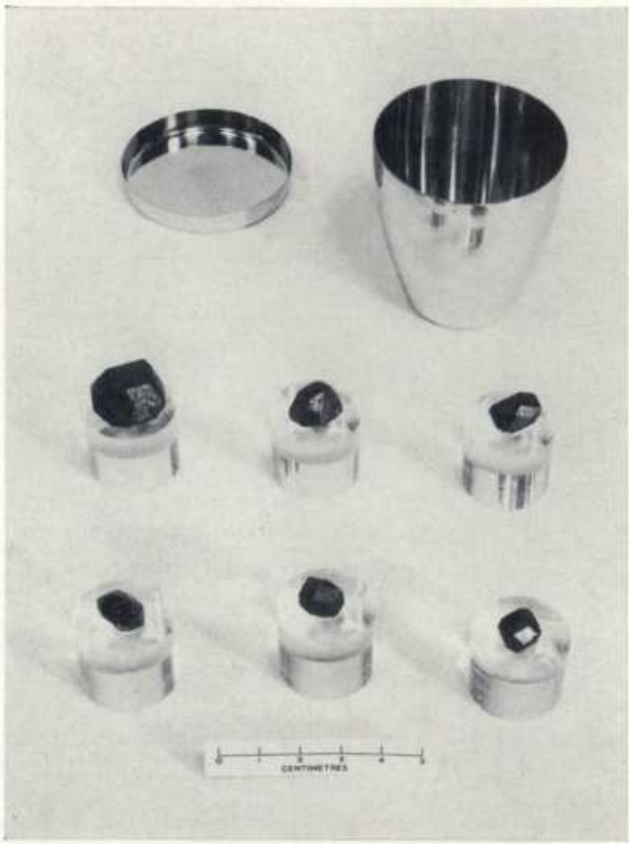


Fig. 4. Granaatkristallen, gekweekt in een loodoxide-loodfluoride-oplossing. De kristallen vertonen een dodecaëderstructuur met (110)- en (211)-vlakken. De gebruikte platinakroezen hebben een nauwsluitend, instulpend deksel om het verlies aan oplosmiddel door verdamping gedurende het groeiproces te beperken.

koelen, hebben wij een grote reeks monokristallen gemaakt van ijzergranaten van de zeldzame aarden en van yttrium-ijzergranaat met verschillende zeldzame-aarde-doteringen (*fig. 4*).

Nadere bijzonderheden over de toepassing van de genoemde methodes in ons laboratorium zijn elders gepubliceerd [1] [*].

Het onderzoek

De doelstelling van het onderzoek was een beter begrip te verkrijgen van een aantal fundamentele factoren die van invloed zijn op technisch belangrijke eigenschappen als de permeabiliteit, de coërcitie, de vorm van de hysteresislus en de microgolfabsorptie, en zodoende deze te leren beheersen. In een polykristallijn materiaal zijn deze eigenschappen in het algemeen niet alleen afhankelijk van de intrinsieke kristaleigenschappen als de chemische samenstelling en het kristroostertype, maar ook van de structuur van het materiaal, met name van de kristalgrootte, de kristalgrenzen, de porositeit en de homogeniteit. Metingen aan monokristallen stellen ons in staat de eigenschappen die niet van de materiaalstructuur afhangen, te scheiden van de andere. Ook kan men alleen langs deze weg die eigenschappen nauwkeurig bestuderen die afhangen van de oriëntatie van de magnetisatie ten opzichte van het kristalrooster.

Hieronder volgt een kort overzicht van de belangrijkste onderzoekingen.

De magnetische anisotropie

Gewoonlijk bevat de magnetische energie van een ferrimagnetisch kristal een bijdrage die als volgt van de richting van de magnetisatie ten opzichte van het kristalrooster afhangt:

$$E = K_1(\alpha_1^2\alpha_2^2 + \alpha_2^2\alpha_3^2 + \alpha_3^2\alpha_1^2) + K_2\alpha_1^2\alpha_2^2\alpha_3^2;$$

K_1 en K_2 zijn de zg. anisotropieconstanten en α_1, α_2 en α_3 de richtingscosinussen van de magnetisatie ten opzichte van het rooster. Wordt het kristal in een magneetveld geplaatst, dan ondervindt het een koppel dat het in een zodanige stand tracht te draaien dat E minimaal is, met andere woorden dat het veld, en bijgevolg de magnetisatie, in een zg. voorkeurs- of gemakkelijke richting ligt. Bij ons onderzoek werden K_1 en K_2 bepaald door koppelmetingen aan monokristallen met een zelfregistrerende torsiemagnetometer. Dit instrument zet voor kleine bolvormige preparaten (diameter maximaal 1,5 mm) het koppel uit tegen de oriëntatie in het veld, bij temperaturen van 1 tot 500 °K in magneetvelden tot 15 kOe.

Uit metingen aan kristallen van mangaanferriet met kobaltsubstitutie [2] bleek dat de temperatuur waarbij $K_1 = 0$ werd, in verband gebracht kon worden met de temperatuur waarbij in de overeenkomstige polykristallijne stof een piek optrad in de beginpermeabiliteit [3] (zie *fig. 5*). De bijdrage van het kobalt tot K_1 verliep lineair met het kobaltgehalte, zoals *fig. 6* laat zien. Dit wijst erop dat de ionen onafhankelijk van elkaar tot de anisotropie bijdragen. De hierop gebaseerde theorie van

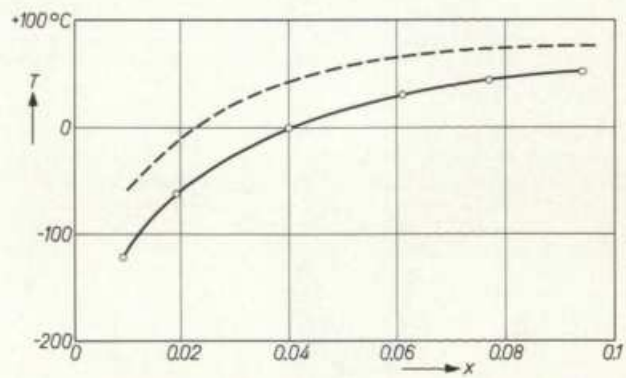


Fig. 5. De temperatuur waarbij in kristallen van mangaanferriet met kobaltsubstitutie $K_1 = 0$ is, uitgezet als functie van de kobaltconcentratie x (getrokken lijn). Eveneens is uitgezet de temperatuur waarbij in de overeenkomstige polykristallijne verbindingen een piek optreedt in de beginpermeabiliteit (streeplijn [3]). Beide blijken op dezelfde wijze van de samenstelling af te hangen.

[*] De noten vindt men op blz. 244.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Slonczewski voor Co^{2+} in Fe_3O_4 moest voor Co^{2+} in $MnFe_2O_4$ op enkele punten gewijzigd worden. Ook werd de invloed van substitutie van Co^{2+} in mangaanferroferriet onderzocht, evenals kobaltvrije samenstellingen waarin het ferro-ionengehalte werd gevarieerd. Dit onderzoek bevestigde dat Fe^{2+} een positieve bijdrage tot de anisotropie kan geven [4] en een gunstige invloed heeft op de permeabiliteit van bepaalde stoffen.

Er werd een groot aantal metingen gedaan aan de ijzergranaten van de zeldzame aarden [5]. Deze verbindingen hebben bij lage temperatuur een zeer grote anisotropie, met hoge waarden van K_2 en termen van hogere orde. *Fig. 7* illustreert dit voor samarium-ijzergranaat (SmIG). Hierin is de anisotropie-energie uitgezet als functie van de magnetisatierichting, bij 77 °K en bij een iets lagere temperatuur. Bij 77 °K, waarbij $K_2/K_1 = -1{,}25$ is, is de voorkeursrichting van de magnetisatie de ⟨111⟩-richting. Bij de lagere temperatuur is $K_2/K_1 = -4$ en de voorkeursrichting is ⟨110⟩.

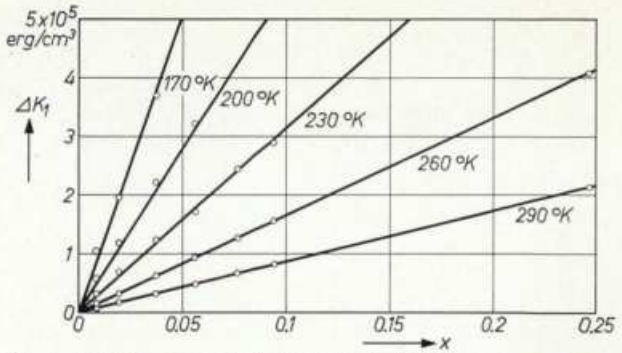


Fig. 6. De bijdrage van kobalt tot K_1 in kristallen van mangaanferriet met kobaltsubstitutie, uitgezet tegen het kobaltgehalte x bij verschillende temperaturen. Het lineaire verloop wijst erop dat elk ion een onafhankelijke bijdrage tot de anisotropie levert.

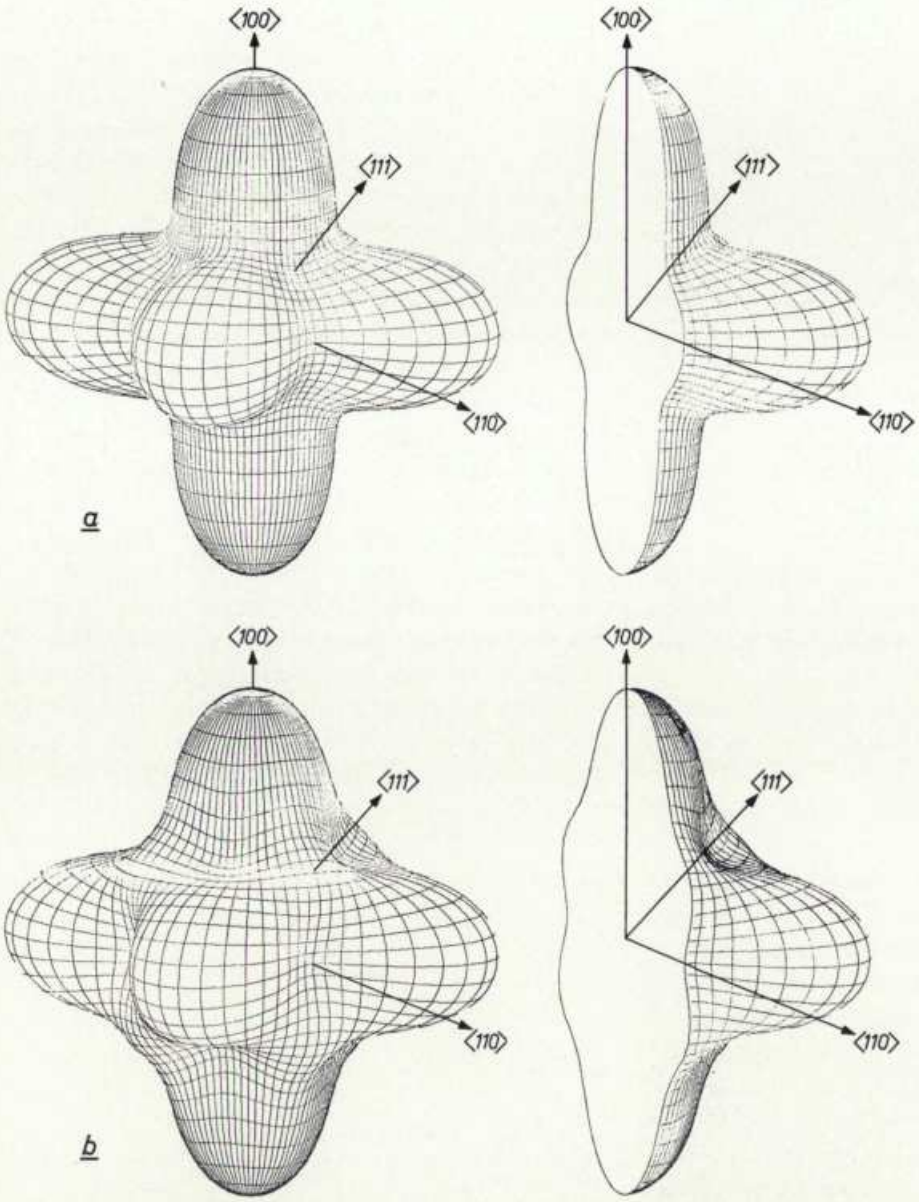


Fig. 7. *a*) Het anisotropie-energie-oppervlak (anisotropie-energie als functie van de magnetisatierichting) bij 77 °K voor samarium-ijzergranaat. ⟨111⟩ is de gemakkelijke richting, ⟨100⟩ en ⟨110⟩ zijn moeilijke richtingen. Zowel het volledige oppervlak als een doorsnede door een (110)-vlak zijn afgebeeld.
b) Hetzelfde bij een lagere temperatuur. In dit geval is ⟨110⟩ de gemakkelijke richting, ⟨111⟩ en ⟨100⟩ zijn moeilijke richtingen. Er zij op gewezen dat de voorkeursrichting een werkelijk minimum is, en niet slechts een zadelpunt dat alleen in een bepaald vlak het minimum is.

Door de grote anisotropie en door de veldafhankelijkheid van de spontane magnetisatie is het bij de ijzergranaten van de zeldzame aarden bij lage temperaturen onmogelijk om aan polykristallijne preparaten nauwkeurige metingen te doen van de magnetisatie. Om deze belangrijke grootheid in die gebieden toch te bepalen, werden metingen aan monokristallen gedaan met het uitwendige veld in de voorkeursrichting [6]. Een voorbeeld van de wijze waarop de snel met de temperatuur veranderende anisotropie de magnetisatie in verschillende richtingen beïnvloedt, ziet men in *fig. 8*; dit gedrag van SmIG klopt met de in fig. 7 weergegeven veranderingen in de anisotropieconstante.

In met zeldzame aarden

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

gedoteerd yttrium-ijzergranaat bij heliumtemperaturen vertoont het veld waarbij ferromagnetische resonantie optreedt, grote pieken in bepaalde kristallografische richtingen[7]. Metingen van koppelkrommen[8] toonden aan dat deze pieken een intrinsieke kristaleigenschap zijn en verklaard kunnen worden met discontinuïteiten in het energie-oppervlak, veroorzaakt door elkaar snijdende energieniveaus in het zeldzame-aarde-ion (*fig. 9*).

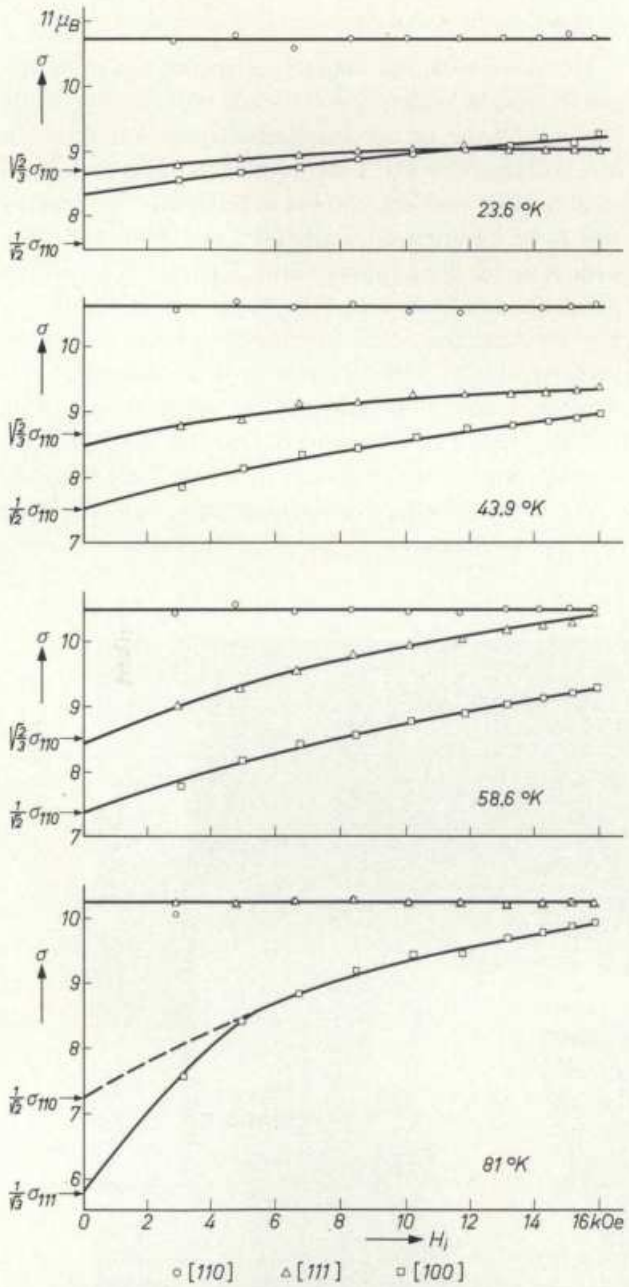


Fig. 8. Magnetisatie in bohrmagnetonen μ_B per formule-eenheid ($5Fe_2O_3.3Sm_2O_3$) als functie van het inwendige veld H_i (het uitwendige veld minus het ontmagnetiserende veld) in de drie kristallografische hoofdrichtingen voor samarium-ijzergranaat. Bij de lage temperaturen is [110] de voorkeursrichting. Bij de metingen in de [111]- en de [100]-richting zijn de magnetisaties niet verzadigd; de naar $H_i = 0$ geëxtrapoleerde waarden komen overeen met de component in de meetrichting van de magnetisatie in de gemakkelijke richting. Bij 23,6 °K is [111] iets moeilijker dan [100], maar wordt steeds minder moeilijk naarmate de temperatuur stijgt, en tussen 58,6 °K en 81 °K wordt [111] de voorkeursrichting. Bij 81 °K draait bij een afnemend inwendig veld in de [100]-richting de magnetisatievector derhalve aanvankelijk naar [110], maar zwaait als de veldsterkte verder afneemt, door naar [111]. Deze metingen zijn in overeenstemming met de energie-oppervlakken van fig. 7.

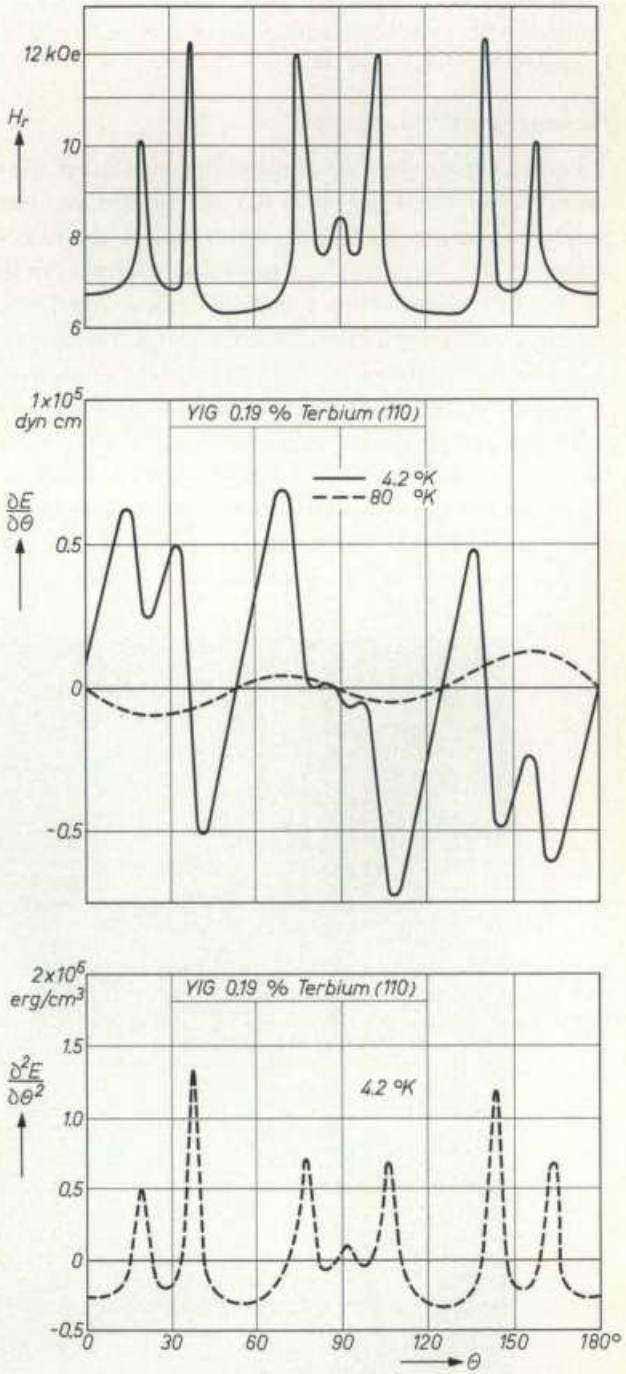


Fig. 9. Een vergelijking van de afgeleide van de (110)-koppelkromme $\partial^2 E/\partial\Theta^2$ voor met terbium gedoteerd yttrium-ijzergranaat met de resultaten van de ferromagnetische resonantiemetingen van Dillon [7] bij 4,2 °K. Θ is de hoek in het (110)-vlak tussen de magnetisatie en een ⟨100⟩-richting, H_r het resonantieveld en E de magnetische anisotropie-energie. De afgeleide (onderste kromme) die werd verkregen door differentiatie van de middelste kromme ($\partial E/\partial\Theta$, het koppel per cm^3) loopt geheel parallel met de resonantieresultaten van Dillon (bovenste kromme), wat erop wijst dat de anomale pieken onafhankelijk van de frequentie zijn.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Deze resultaten van anisotropiemetingen zijn zeer waardevol gebleken als bevestiging van de theorie betreffende de anisotropie in granaten [9]. In combinatie met bij hoge frequenties verkregen gegevens over de dynamische anisotropie zijn deze resultaten tevens gebruikt om het relaxatiemechanisme in deze magnetische systemen te bestuderen [10].

Ferromagnetische resonantie

Ferromagnetische resonantiemetingen werden aanvankelijk ter hand genomen om de bijdrage van een anisotroop ion, zoals kobalt, tot de lijnbreedte te bestuderen. De gebruikte apparatuur is weergegeven in *fig. 10*. Bovendien vormde het anisotropie-onderzoek van de granaten een stimulans om het gedrag van de zeldzame aarde-ionen bij ferromagnetische resonantie te bestuderen. Hieruit bleek dat deze (of andere anisotrope magnetische) ionen op onverwachte wijze grote verliezen bij microgolffrequenties kunnen veroorzaken. De herkomst van deze verliezen veroorzaakt tevens de frequentie-afhankelijkheid van de anisotropie en houdt ook verband met de verliezen die bij lagere frequenties optreden als gevolg van de beweging van Bloch-wanden. Dit zal in een volgende paragraaf uitvoeriger worden beschreven.

Magnetisatieprocessen en verliezen in zwakke velden

Het onderzoek van magnetisatieprocessen en verliezen in zwakke velden begon met de bestudering van de lusvorm en van de schakeleigenschappen van ferrieten met rechthoekige lus. Later werd een onderzoek ingesteld naar de oorzaak van het in ferrieten voor spoelen van hoge kwaliteit zo hinderlijke verschijnsel dat bekend staat als desaccommodatie. Hierbij verandert de permeabiliteit in de loop van de tijd of als gevolg van een mechanische schok. Gevoelige metingen werden verricht van de verandering in de rotatiepermeabiliteit van een magnetietmonokristal bij verandering van de richting van een verzadigend veld [11]. Uit de wijze waarop deze verandering van de hoek afhing kon men afleiden dat het effect veroorzaakt wordt door diffusie van kationvacatures op de octaëderplaatsen van het

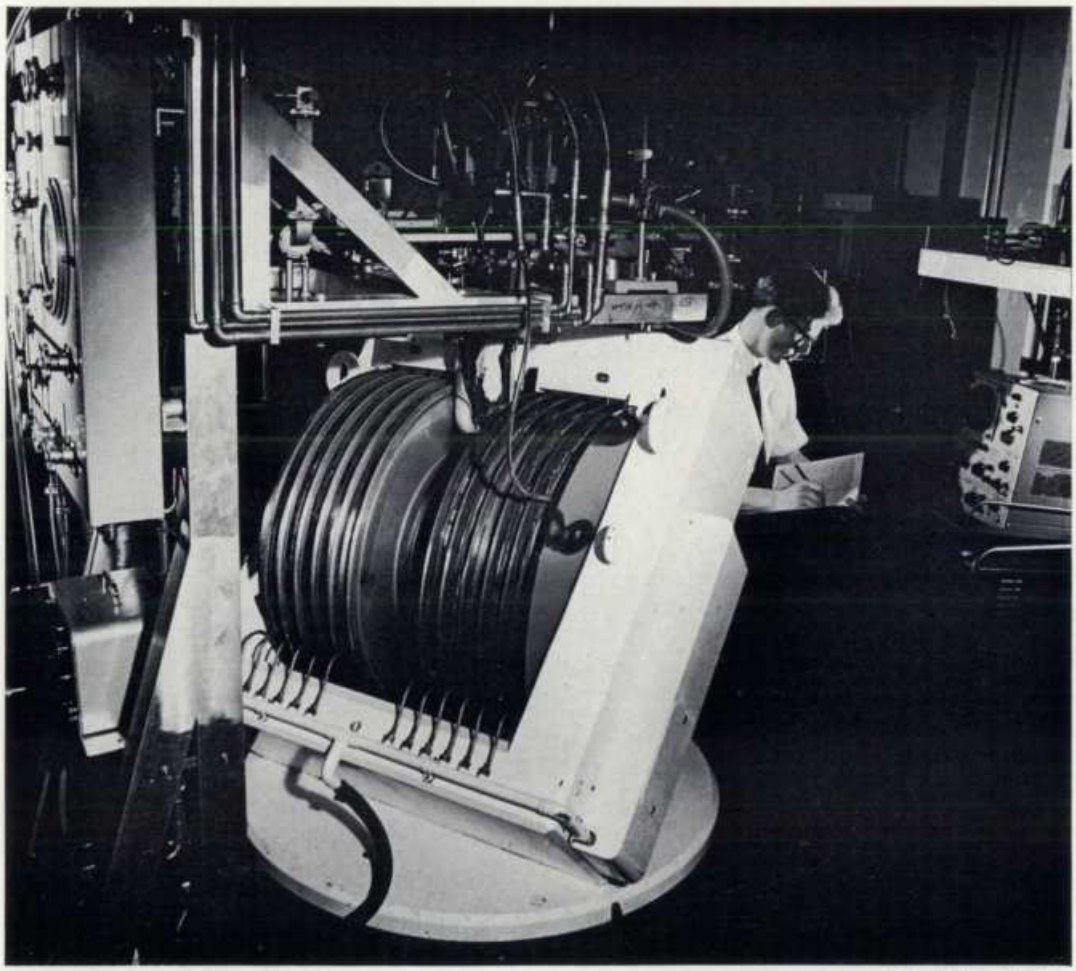


Foto Walter Nürnberg

Fig. 10. Apparatuur voor ferromagnetische-resonantiemetingen aan monokristallen van ferrieten en granaten bij microgolffrequenties en bij lage temperaturen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

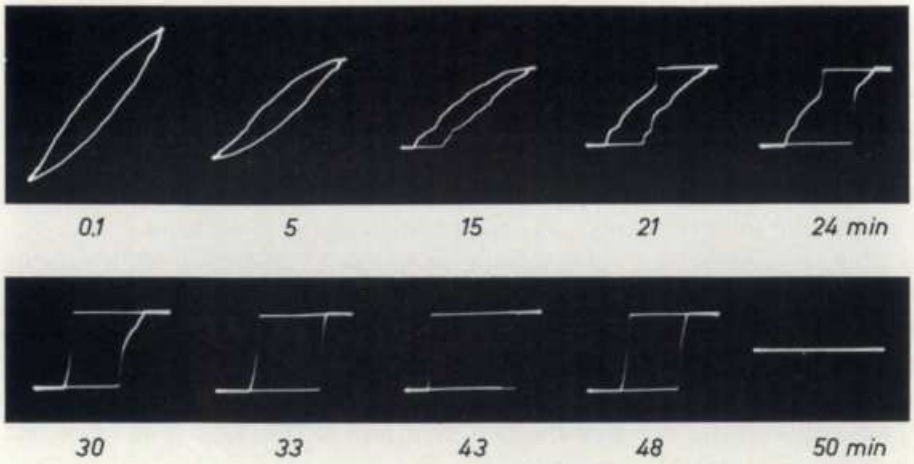


Fig. 11. Het met de tijd verlopende effect van een wisselveld op een hysteresis-binnenlus van een gedemagnetiseerde toroïde van magnetiet. Na verloop van tijd ontstaan er potentiaalgeulen aan de randen van het gebied waarbinnen de Bloch-wand zich beweegt, waardoor de verblijftijd van de wand aldaar toeneemt. De lus wordt steeds rechthoekiger, totdat de geul diep genoeg is om de wand permanent te verankeren, waarna de lus verdwijnt. Voor elke lus is de sedert de demagnetisatie verstreken tijd opgegeven.

ferrietrooster. Door het ferriet zodanig te stoken dat alle vacatures bezet worden, kan men de desaccommodatie tot een minimum beperken.

Een onverwachte ontwikkeling in dit onderzoek was de ontdekking dat men, dank zij de desaccommodatie, Bloch-wanden een „geul" voor zichzelf kan laten graven waarvan de vorm en de verdeling bepaald worden door een wisselend uitwendig magneetveld [12]. Dit biedt de mogelijkheid om voor nieuwe geheugensystemen lusvormen „naar maat" te bestellen. In *fig. 11* kan men het met de tijd verlopende effect zien van een wisselveld op een hysteresis-binnenlus van een oorspronkelijk gedemagnetiseerde toroïde van magnetiet. Een voor de praktijk geschikt materiaal zou een dergelijk gedrag vertonen bij hoge temperatuur; een aldus gevormde vierkante-luskarakteristiek zou dan behouden kunnen worden door af te schrikken naar kamertemperatuur.

De frequentie-afhankelijkheid van de anisotropie en de microgolfrelaxatie

Zoals wij boven reeds hebben opgemerkt, werd de magnetische anisotropie gemeten door middel van statische torsie-experimenten, terwijl ook het onderzoek met ferromagnetische resonantie gegevens verschafte over de anisotropie — ditmaal niet de statische anisotropie, maar die bij microgolven (9 GHz en 16 GHz).

Voor sommige materialen, in het bijzonder voor met Yb gedoteerd yttrium-ijzergranaat (YIG), was er een aanmerkelijke discrepantie tussen de resultaten van de torsiemetingen en die van de resonantiemetingen [10]. Het verschil bestond hoofdzakelijk hierin dat de gemeten resonantievelden zwakker waren dan men op basis van de torsiemetingen zou berekenen. Deze zg. dynamische verschuiving was nul bij lage temperatuur (4,2 °K) en bij temperaturen boven 200 °K, terwijl zich bij omstreeks 20 °K een maximum bevond. Uitvoeriger metingen werden gedaan door Clarke [13] aan 5% Yb in YIG, weergegeven in *fig. 12*.

Bij de resonantiemetingen manifesteert tevens elk

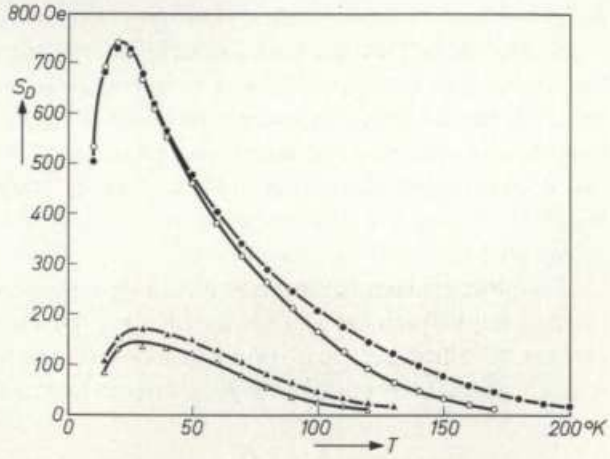


Fig. 12. De dynamische verschuiving S_D van het resonantieveld voor 5% Yb in YIG, als functie van de temperatuur T, gemeten in de [111]-richting (cirkels) en in de [100]-richting (driehoeken) bij 9,3 GHz (open tekentjes) en 16,8 GHz (dichte tekentjes).

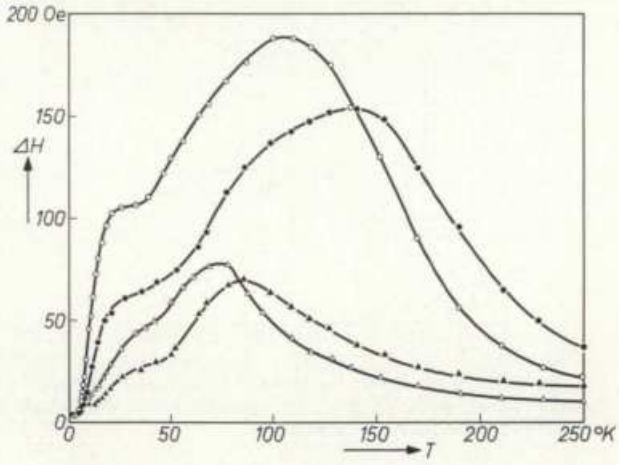


Fig. 13. De lijnbreedte ΔH als functie van de temperatuur T voor 5% Yb in YIG in de [111]-richting (cirkels) en in de [100]-richting (driehoeken) bij 9,3 GHz (open tekentjes) en 16,8 GHz (dichte tekentjes).

verliesmechanisme zich in een verbreding van de resonantielijnen. *Fig. 13* geeft de lijnbreedten voor met Yb gedoteerd YIG. (Hetzelfde preparaat werd gebruikt voor de resonantieveldmetingen.) De kromme heeft een

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

maximum tussen 100 °K en 150 °K dat nog van de meetfrequentie afhangt, en een duidelijke schouder bij 20 °K.

De oorsprong van de discrepantie moet gezocht worden in de premisse dat de gemeten anisotropie onafhankelijk is van de meetfrequentie. Dit was kennelijk niet juist en men moest zich opnieuw bezinnen op de theorie betreffende de oorsprong van de anisotropie.

Zuiver YIG heeft een betrekkelijk geringe anisotropie, die enorm vergroot kan worden door een aantal yttriumionen te vervangen door zeldzame-aardionen. De sterk toegenomen anisotropie moet dus bijna geheel aan de gesubstitueerde ionen worden toegeschreven. In de thans aanvaarde theorie van de anisotropie berekent men de anisotropie per ion en telt de verkregen bijdragen eenvoudig op om de totale anisotropie te krijgen.

Bij ieder ion behoort een aantal mogelijke toestanden waarin het kan verkeren, met een voor elke toestand verschillende energie. De energieverschillen ontstaan door de interactie van het ion met het elektrische veld van de omringende kristalstructuur, en worden mede bepaald door de plaatsruilwisselwerking met de naburige ferri-ionen via de tussenliggende zuurstofionen. De energieverschillen hangen ook af van de stand van het magnetisch moment van het ferri-ion ten opzichte van het kristalrooster; de niveaus zijn in de regel anisotroop. De situatie is geschetst in *fig. 14* (ter vereenvoudiging nemen wij aan dat er slechts twee niveaus zijn). De energie E is uitgezet als functie van Θ, de hoek die het resulterende moment van de ferri-ionen, en bijgevolg de magnetisatie, met een gegeven kristalrichting maakt, in een bepaald vlak.

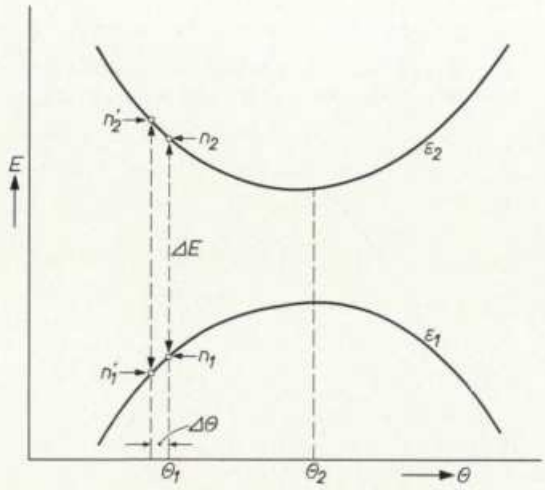


Fig. 14. De energie E van ionen van zeldzame aardmetalen als functie van Θ, de hoek die de magnetisatie met een bepaalde kristallografische richting maakt.

Op een gegeven moment bevindt elk ion zich in één van de twee toestanden, en de verdeling van de ionen over de toestanden wordt bepaald door de temperatuur. Bij lage temperatuur ($kT \ll \Delta E$) zijn de meeste ionen in de grondtoestand ε_1, terwijl bij hoge temperatuur ($kT \gg \Delta E$) er ongeveer evenveel in de toestand ε_1 als in de toestand ε_2 verkeren. De verdeling van de ionen over de twee toestanden wordt gegeven door de verdelingsfunctie van Boltzmann.

De totale vrije energie vindt men nu door de vrije energie van alle ionen op te tellen. Daar de niveaus anisotroop zijn, kan ook de totale vrije energie anisotroop worden; de temperatuurafhankelijkheid van de anisotropie vindt zijn oorzaak in de wijziging van de bezettingen n_1 en n_2 van de twee niveaus bij variërende temperatuur.

Er is nog een parameter die in deze beschouwing van belang is: de relaxatietijd van het systeem. Verstoren wij op een of andere manier de bezettingen die er bij thermodynamisch evenwicht zijn, dan kost het een bepaalde tijd τ voordat het evenwicht hersteld is. Deze tijd is een maat voor de sterkte van de interactie tussen de ionen en het omringende kristalrooster. Deze interactie vindt meestal plaats door middel van fononen, maar in een ferromagnetisch kristal kunnen ook spingolven (magnonen) voor de interactie verantwoordelijk zijn. Karakteristieke waarden van τ zijn van de orde 10^{-10} s.

Bezien wij nu de twee genoemde soorten metingen: de torsiemethode en de ferromagnetische-resonantiemeting.

Bij torsiemetingen verplaatst de magnetisatie zich betrekkelijk langzaam, d.w.z. $\tau \mathrm{d}\Theta/\mathrm{d}t \ll 1$, zodat het systeem bij elke hoek voldoende tijd heeft om in evenwicht te komen. De aldus gevonden anisotropie is de statische anisotropie.

Bij een microgolfresonantiemeting echter oscilleert het magnetisch moment met een frequentie ω om een gemiddelde richting en het is mogelijk dat $\omega\tau \geqq 1$. In dat geval heeft het systeem niet de tijd om bij welke hoek dan ook in evenwicht te komen, en de bezettingsgetallen n_1 en n_2 wijken af van de Boltzmann-verdeling.

Vindt de resonantiemeting plaats in b.v. punt Θ_2 in fig. 14, waar de energiekrommen vlak zijn, dan zal in eerste benadering in het interval $\Delta\Theta$ (de precessiehoek van het moment) de afstand tussen de energieniveaus niet veranderen. Dan behoeven n_1 en n_2 dus ook niet te veranderen om evenwicht te handhaven. In dergelijke punten is er overeenstemming tussen statische en dynamische metingen. Maar in een punt als Θ_1, waar de energieniveaus een bepaalde gradiënt bezitten, moeten bij variatie van Θ de evenwichtswaarden van n_1 en n_2 veranderen (naar n'_1 en n'_2). De ogenblikswaarden van n_1 en n_2 blijven daarbij in faze achter, en zoals gebruikelijk, zal dit resulteren in energieverlies.

De lijnbreedte ΔH van het resonantieveld ten ge-

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

volge van deze frequentie-afhankelijke anisotropie is [14]:

$$\Delta H \sim \frac{\omega\tau}{1+(\omega\tau)^2}\,\frac{1}{kT\cosh^2\dfrac{\Delta E}{2kT}}\left[\left(\frac{\partial\Delta E}{\partial\Theta}\right)^2+\left(\frac{\partial\Delta E}{\partial\varphi}\right)^2\right]. \quad (1)$$

De eerste factor in het rechterlid van verg. (1) geeft de invloed van de frequentie en de relaxatietijd op de lijnbreedte. Deze factor heeft een maximum bij $\omega\tau = 1$; via τ is deze factor een functie van de temperatuur. Dit verklaart de hoofdpiek in fig. 13.

De tweede factor geeft de expliciete temperatuurafhankelijkheid die berust op de thermische verdeling van de bezettingen over de niveaus ε_1 en ε_2, gescheiden door de energie ΔE. Deze functie is weergegeven in *fig. 15*. Bij lage temperatuur ($kT \ll \Delta E$) is de functie nul omdat alle ionen zich in de grondtoestand bevinden en een geringe verandering in ΔE de verdeling niet merkbaar beïnvloedt. Bij hoge temperatuur ($kT > \Delta E$) gaat de functie opnieuw naar nul (met $1/T$). Dit komt doordat de twee niveaus dan ongeveer gelijk bezet zijn en een herverdeling niet veel aan de situatie verandert. De schouder op de lijnbreedtekromme in fig. 13 vindt zijn oorzaak in deze factor.

De laatste factor laat zien op welke wijze de lijnbreedte afhangt van de vorm van de energieniveaus. (Omdat bij een resonantiemeting het moment een precessie uitvoert en dus niet in één vlak blijft, moeten wij twee hoekvariabelen invoeren in onderling loodrechte vlakken.)

Bovenstaande overwegingen (in navolging van Clogston [15]) verklaren de schijnbare discrepantie tussen de uitkomsten van statische en resonantiemetingen voor Yb in YIG. (Voor dit systeem waren de energieniveaus bekend uit optische metingen, zodat de resultaten rechtstreeks geverifieerd konden worden.)

De theorie, die algemeen toepasbaar is, werd ook gebruikt voor het verkrijgen van gegevens over de energieniveaus van Nd in YIG [16] en ter verklaring van de resultaten van microgolfmetingen in $Mn_xFe_yO_4$ [17]. Hij werd in detail toegepast op Eu in YIG [18], op Er in YIG [19] en op Co^{2+} [20].

In de bovenstaande behandeling werd als voorbeeld van een dynamisch geval ($\omega\tau > 1$) de situatie bij een microgolfresonantiemeting genoemd. Wanneer wij echter bedenken wat er gebeurt als een Bloch-wand zich door een ferromagnetisch kristal verplaatst, dan stuiten we op hetzelfde verliesmechanisme. In plaats van dat het moment om een bepaalde vaste positie precedeert, verandert nu, wanneer de wand een bepaald punt in het kristal passeert, het moment in dat punt over een grote hoek van richting. Als de snelheid van de Bloch-wand v bedraagt en de dikte van de wand d, dan wordt de effectieve hoeksnelheid voor een 180°-wand gegeven door $\omega = \pi v/d$. Bij een voor Bloch-wanden gebruikelijke snelheid van 10^3 cm/s en een dikte van 10^{-6} cm zien wij dat $\omega\tau = 1$ is voor $\tau \approx 10^{-10}$ s. Het relaxatiemechanisme geeft energieverlies in de wand, en derhalve demping van de beweging van de wand. In het temperatuurgebied waar de tweede factor van verg. (1) zijn maximale waarde bereikt, mogen wij wellicht verwachten dat dit verlies bepalend is voor de begrenzing van de wandsnelheid. (In zuiver YIG wordt de snelheid van de Bloch-wanden begrensd door een nog niet geheel begrepen proces, en het effect van de anisotrope ionen zal steeds samen met dit onbekende effect het totale resultaat bepalen.)

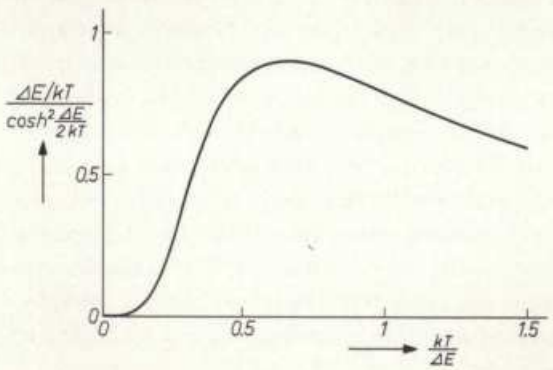


Fig. 15. Grafische voorstelling van de factor in vergelijking (1) die expliciet van de temperatuur afhangt.

Ook experimenten voor het meten van de beginsusceptibiliteit brengen Bloch-wandverschuivingen teweeg. Een gedetailleerde toepassing van een soortgelijke theorie als die voor ferromagnetische resonantie levert frequentie-afhankelijke dempingsconstanten op en voorspelt ook, op dezelfde wijze als bij de microgolfresonantie, een verschuiving van de resonantiefrequentie van het systeem.

Nog een vermeldenswaard aspect van dit model houdt verband met het gedrag van ferrieten bij grote vermogens. Dit gedrag wordt bepaald door de demping van de spingolven (met andere woorden door de spingolflijnbreedten). Voor spingolven met een golflengte die zeer veel groter is dan de afmetingen der ionen, is hetzelfde verliesmechanisme werkzaam. Anisotrope ionen zullen dus ook van invloed zijn op microgolfapparaten voor grote vermogens waarin ferrieten worden toegepast.

Samenvattend zien wij dus dat het beschreven verliesmechanisme een belangrijke rol kan spelen — niet alleen bij de eenvoudige spinprecessie bij microgolffrequenties maar ook bij spingolven en bij Bloch-wandprocessen — doordat het de schakelsnelheid begrenst en frequentie-afhankelijke verliezen in materialen zonder voormagnetisatie veroorzaakt.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Met name de bovengenoemde ionen (de zeldzame aarden, Co^{2+}, Mn^{3+} en Fe^{2+}) hebben in het algemeen een duidelijk effect op de kristalanisotropie. De theorie is waarschijnlijk op elk anisotroop ion in een bepaald frequentiegebied van toepassing, maar het is natuurlijk mogelijk dat in polykristallijne materialen andere processen overheersen. Fe^{2+} komt in vele technologisch belangrijke polykristallijne spinellen voor; hoewel de structuur van de energieniveaus van dit ion niet tot in bijzonderheden bekend is, mag men aannemen dat het besproken verliesmechanisme een belangrijke invloed heeft. Een ander aspect van het Fe^{2+}-ion is, dat het energieniveauschema in plaats van een eigenschap van het ion zelf te zijn, wellicht bepaald wordt door de migratie van elektronen tussen de verschillende octaëderplaatsen. Co^{2+} beïnvloedt de anisotropie zeer sterk en voor relaxatietijden van de orde van grootte ω^{-1} voorspelt de theorie zeer grote lijnbreedten en dynamische verschuivingen. Vroegere resultaten [21] tonen echter aan dat bij alle temperaturen $\tau \approx 10^{-12}$ s is, zodat men pas bij zeer hoge frequenties een effect van betekenis kan verwachten. Mn^{3+} heeft bij kamertemperatuur een ongeveer even grote relaxatietijd, maar bij lagere temperaturen wordt $\tau \approx 10^{-10}$ s, waardoor in dit geval in het microgolfgebied grote effecten optreden.

De toepassing van monokristallen

In de inleiding werd het doel van het bestuderen van ferrieten in monokristallijne toestand omschreven als het beter leren begrijpen en beheersen van de technisch belangrijke eigenschappen van deze stoffen.

Het zou echter misleidend zijn de indruk achter te laten dat ferriet- en granaatmonokristallen alleen van nut zouden zijn als studiemateriaal ten einde polykristallijne materialen met nauwkeuriger vastgelegde eigenschappen te kunnen produceren. In feite spelen monokristallen sedert een aantal jaren ook een rol in geavanceerde toepassingen bij microgolffrequenties. Ten slotte vermelden we nog dat granaatmonokristallen — die transparant zijn in het infrarood — wellicht toegepast zullen kunnen worden in nieuwe apparaten voor het manipuleren met licht; de huidige activiteit in dit laboratorium op het gebied van monokristallen is gedeeltelijk hierop gericht [22].

Literatuur

[1] F. W. Harrison, The growth of oxide single crystals containing transition metal ions, Research **12**, 395, 1959.
F. W. Harrison, The growth of ferrite and other magnetic oxide single crystals, Proc. Brit. Ceramic Soc. **2**, 91, 1964.

[2] R. F. Pearson, The magneto-crystalline anisotropy of cobalt-substituted manganese ferrite, Proc. Phys. Soc. **74**, 505, 1959.

[3] C. M. van der Burgt, Controlled crystal anisotropy and controlled temperature dependence of the permeability and elasticity of various cobalt-substituted ferrites, Philips Res. Repts. **12**, 97, 1957.

[4] R. F. Pearson, Magnetic anisotropy in ferrimagnetic crystals, J. appl. Phys. **31**, Suppl., 160 S, 1960.

[5] R. F. Pearson, Magnetocrystalline anisotropy of rare-earth iron garnets, J. appl. Phys. **33**, Suppl., 1236, 1962.

[6] F. W. Harrison, J. F. A. Thompson en K. Tweedale, Single crystal magnetization data for rare-earth iron garnets below room temperature, Proc. Int. Conf. on Magnetism, Nottingham 1964, blz. 664.
F. W. Harrison, J. F. A. Thompson en G. K. Lang, Single crystal magnetization data for anisotropic rare-earth iron garnets at low temperatures, J. appl. Phys. **36**, 1014, 1965.

[7] J. F. Dillon Jr. en J. W. Nielson, Ferrimagnetic resonance in impurity doped yttrium iron garnet, J. appl. Phys. **31**, Suppl., 43 S, 1960.

[8] R. F. Pearson en R. W. Cooper, Torque measurements on rare-earth doped yttrium iron garnet, J. appl. Phys. **32**, Suppl., 265 S, 1961.

[9] R. F. Pearson en K. Tweedale, Field dependence of anisotropy in ytterbium-doped yttrium iron garnet, J. appl. Phys. **35**, 1061, 1964.
R. F. Pearson, Magnetocrystalline anisotropy of ytterbium iron garnet $Yb_3Fe_5O_{12}$, Proc. Phys. Soc. **86**, 1055, 1965.

[10] R. W. Teale, R. F. Pearson en M. J. Hight, Ferrimagnetic resonance and torque measurements on ytterbium-substituted yttrium iron garnet, J. appl. Phys. **32**, Suppl., 150 S, 1961.

[11] J. E. Knowles, Induced uniaxial anisotropy in magnetite at room temperatures, Proc. Int. Conf. on Magnetism, Nottingham 1964, blz. 619.

[12] J. E. Knowles en A. Broese van Groenou, A new manifestation of magnetic after-effect, Phys. Stat. sol. **14**, 91, 1966.

[13] B. H. Clarke, K. Tweedale en R. W. Teale, Rare-earth ion relaxation time and G tensor in rare-earth-doped yttrium iron garnet, I. Ytterbium, Phys. Rev. **139**, A 1933, 1965.

[14] R. W. Teale en K. Tweedale, Ytterbium ion relaxation and ferrimagnetic resonance, Physics Letters **1**, 298, 1962.

[15] A. M. Clogston, Relaxation phenomena in ferrites, Bell Syst. tech. J. **34**, 739, 1955.

[16] B. H. Clarke, Rare-earth ion relaxation time and G tensor in rare-earth-doped yttrium iron garnet, II. Neodymium, Phys. Rev. **139**, A 1944, 1965.

[17] B. H. Clarke, Resonance relaxation in $Mn_xFe_{3-x}O_4$ by slow relaxing manganic and ferrous ions, J. Phys. Chem. Solids **27**, 353, 1965.

[18] R. C. Le Craw, W. G. Nilsen, J. P. Remeika en J. H. van Vleck, Ferrimagnetic relaxation in europium iron garnet, Phys. Rev. Letters **11**, 490, 1963.

[19] B. H. Clarke, R. F. Pearson, R. W. Teale en K. Tweedale, Rare earth ion relaxation in ferrimagnetic resonance, J. appl. Phys. **34**, 1269, 1963.

[20] R. W. Teale en B. H. Clarke, Ferrimagnetic resonance anomalies in cobalt-substituted manganese ferrite crystals, J. appl. Phys. **34**, 1248, 1963.

[21] R. W. Teale, niet gepubliceerd.

[22] R. F. Pearson en R. W. Cooper, Magnetic crystals that manipulate light, New Scientist **32**, 92, 1966.

Samenvatting. Een aantal onderzoekingen in het Mullard research-laboratorium hebben als doelstelling een vollediger begrip en een betere beheersing van een aantal fundamentele factoren die van invloed zijn op de technisch belangrijke eigenschappen van ferrieten en granaten. Hiertoe behoort de invloed van Co^{2+} en Fe^{2+} in spinelferrieten en van zeldzame-aardionen in ferrimagnetische granaten op de magnetische anisotropie. De frequentie-afhankelijkheid van deze anisotropie is het gevolg van een relaxatieproces van het systeem van anisotrope ionen dat zowel verband houdt met microgolfresonantieverliezen als met Bloch-wandverschijnselen. De migratie van kationvacatures, een betrekkelijk traag proces in vergelijking met de relaxatie van de ionen, blijkt desaccommodatie te veroorzaken en een middel aan de hand te doen om rechthoekige hysteresislussen te produceren.

De gebruikte methodes voor het kweken van monokristallen, die onmisbaar zijn voor de beschreven onderzoekingen, worden besproken alsmede mogelijke praktische toepassingen van monokristallen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Kristallen voor het laboratorium

Voor het kweken van kristallen is in het Mullard-laboratorium een speciale afdeling ingericht. Synthetische monokristallen krijgen voor de elektronische industrie hoe langer hoe meer belang, zowel als onderdeel van produkten als voor het onderzoek van fundamentele eigenschappen van materialen, al worden deze in feite in polykristallijne vorm toegepast. Voor de fabricage van transistors kweekt en gebruikt men al sinds vele jaren kristallen van halfgeleiders. Van jongere datum zijn de maser en de laser, waarvoor men kristallen van niet-geleidende materialen nodig heeft die paramagnetische ionen als opzettelijk toegevoegde verontreinigingen bevatten. Door deze ionen krijgen de kristallen karakteristieke kleuren: kobalt geeft blauw, chroom geeft rood, nikkel geeft geel enz. De meeste kristallen van de hier afgebeelde verzameling zijn in zuivere vorm kleurloos. Van deze kristallen was het merendeel bestemd voor onderzoekingen aan masersystemen; enkele moesten dienen voor experimenten betreffende quantumtellers en voor het maken van ultrasone transducenten voor vertragingslijnen die in televisie worden toegepast.

Sommige van de kristallen — in het algemeen de langere — zijn gegroeid uit de smelt volgens de methodes van Verneuil of Czochralski. De smeltpunten van deze materialen variëren van ongeveer 1100 °C tot boven 2000 °C. De overige kristallen — herkenbaar aan de beter ontwikkelde grensvlakken — zijn gegroeid uit een oplossing, hetzij in een mengsel van loodoxide en loodfluoride bij 900 °C tot 1300 °C, of in water bij ongeveer 50 °C.

De afgebeelde collectie bevat kristallen van zinkwolframaat, lithiumniobaat, yttrium-aluminiumgranaat, robijn, magnesium-aluminiumspinel en kalium-kobaltcyanide.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Fysisch onderzoek aan masermaterialen

J. W. Orton, D. H. Paxman en J. C. Walling

Inleiding

Het principe van de op drie niveaus werkende vastestofmaser werd in 1956 door Bloembergen aangegeven [1]. Gedurende de zes daarop volgende jaren werd er op dit gebied een grote activiteit ontplooid. Het voornaamste succes daarvan was de ontwikkeling van de lopendegolfmaser voor de communicatie via satellieten.

De masers die door de British General Post Office in het ontvangstation in Goonhilly Down (Cornwall) gebruikt worden, en die in het Mullard-laboratorium zijn ontwikkeld, zijn reeds eerder in dit tijdschrift beschreven [2]. Het daarin gebruikte actieve materiaal was robijn (met Cr^{3+} gedoteerd aluminiumoxide), maar ook andere materialen, zoals met Cr^{3+} gedoteerd zinkwolframaat ($ZnWO_4$) en smaragd (met Cr^{3+} gedoteerd $Be_3Al_2Si_6O_{18}$), hebben sterk de aandacht getrokken. In al deze materialen zijn de paramagnetische Cr^{3+}-ionen verantwoordelijk voor de maserwerking. Deze ionen vormen samen het zg. spinsysteem.

De belangrijke materiaalparameters voor maserwerking zijn: de energieverschillen van de niveaus, ontstaan door splitsing van de grondtoestand van het Cr^{3+}-ion en regelbaar met een uitwendig magneetveld, de waarschijnlijkheden en de lijnbreedten van de door straling geïnduceerde overgangen tussen deze niveaus, en de bezettingsinversie die met behulp van een bepaald pompschema geproduceerd wordt. Tot deze laatste parameter zullen we ons hieronder beperken.

De bezettingsinversie

Beschouw de drie energieniveaus in *fig. 1*. In thermisch evenwicht wordt de verhouding van de bezettingen bepaald door de verdeling van Boltzmann:

$$n_i \sim \exp(-E_i/kT), \qquad \ldots\ldots \quad (1)$$

weergegeven door de streeplijn in fig. 1. Deze verdeling wordt in stand gehouden door relaxatieprocessen ten gevolge van de wisselwerking van het spinsysteem met het rooster. Is er pompstraling met de frequentie $f_{13} = (E_3 - E_1)/h$ die voldoende sterk is om de overgang $1 \rightarrow 3$ te verzadigen (d.i. n_1 en n_3 gelijk te maken), dan ontstaat er bij voorbeeld een verdeling zoals die door de dikke lijnen is weergegeven; vergeleken met thermisch evenwicht zijn de bezettingen van de niveaus *1* en *2* nu geïnverteerd. Voor een efficiënte maserwerking moet $n_2 - n_1$ zo groot mogelijk worden.

Voor $n_2 - n_1$ vindt men in de stationaire toestand met verzadigde pompniveaus de volgende uitdrukking [2]:

$$\frac{n_2 - n_1}{N} = \frac{w_{23}\left[\exp\frac{hf_{23}}{kT} - 1\right] - w_{12}\left[\exp\frac{hf_{12}}{kT} - 1\right]}{w_{23}\left[2 + \exp\frac{hf_{23}}{kT}\right] + w_{12}\left[2\exp\frac{hf_{12}}{kT} + 1\right]}. \qquad \ldots \quad (2)$$

Hierin is $N = n_1 + n_2 + n_3$, en w_{ij} is de relaxatie-overgangswaarschijnlijkheid — een maat voor de spin-roosterkoppeling — voor de overgang $i \rightarrow j$. In het vaak voorkomende geval dat hf_{12} en $hf_{23} \ll kT$ zijn, gaat (2) over in:

$$\frac{n_2 - n_1}{N} = \frac{h}{3kT}\,\frac{w_{23}f_{23} - w_{12}f_{12}}{w_{23} + w_{12}}, \qquad \ldots \quad (3)$$

waarmee de afhankelijkheid van $n_2 - n_1$ van de f_{ij} en w_{ij} een eenvoudige vorm gekregen heeft. Het is mogelijk de inversie groot te maken door een materiaal te kiezen met een grote nulveldsplitsing, waardoor

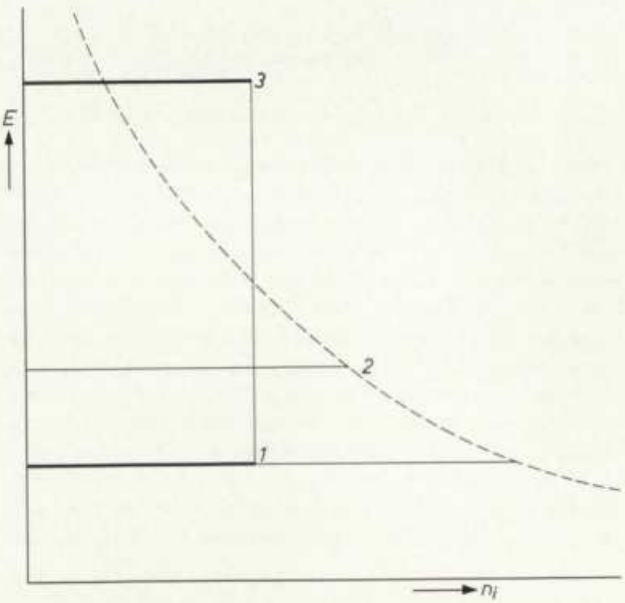


Fig. 1. De niveaubezetting n_i bij drie waarden van de energie E. De bezetting van de niveaus *1* en *2* is geïnverteerd als gevolg van pompstraling die de overgang $1 \rightarrow 3$ verzadigt.

J. W. Orton, D. Phil., D. H. Paxman, M. A., en J. C. Walling, Ph. D., medewerkers van Mullard Research Laboratories, Redhill (Surrey), Engeland.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

$f_{23} \gg f_{12}$ wordt, maar het gedrag van de w_{ij} is minder duidelijk. In het volgende hoofdstuk zullen we de spin-roosterkoppeling meer in detail bespreken.

Vergelijking (2) voor het bezettingsverschil bij inversie is alleen geldig als de wisselwerking tussen de paramagnetische ionen onderling verwaarloosd kan worden, d.w.z. als de concentratie van deze ionen tamelijk laag is. Bij de concentraties die in voor de praktijk geschikte masermaterialen voorkomen, moet men echter ook rekening houden met de „wisselrelaxatie" (Engels: „cross relaxation"), die ontstaat door de magnetische dipoolkoppeling tussen naburige magnetische ionen.

Fig. 2 illustreert een bepaald type van deze relaxatie, de harmonische wisselrelaxatie, die kan optreden als twee van de energieverschillen $E_i - E_j$ in een eenvoudige harmonische relatie tot elkaar staan; zo is b.v. in fig. 2: $f_{12} = 2f_{23}$. In dit geval kunnen twee van de ionen *I* en *II* van niveau *3* een sprong naar *2* maken, terwijl een derde ion *III* van *1* naar *2* springt. Door de

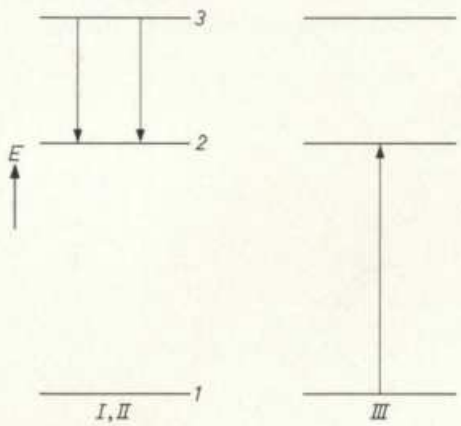


Fig. 2. Voorbeeld van een proces van harmonische wisselrelaxatie in een systeem met drie niveaus. De verhouding tussen de niveauafstanden is $(E_2 - E_1) : (E_3 - E_2) = 2 : 1$, zodat energie behouden blijft als de ionen *I* en *II* van *3* naar *2* overgaan terwijl het ion *III* tegelijkertijd overgaat van *1* naar *2*.

frequentieverhouding 2 : 1 is er dan energiebehoud binnen het spinsysteem als geheel.

De betekenis van dergelijke processen is dat zij de ionen over de beschikbare niveaus herverdelen en daardoor de met een bepaald pompschema bereikbare inversie aanzienlijk kunnen beïnvloeden. Het belang van dit effect wordt bepaald door de verhouding van de „overgangswaarschijnlijkheid voor wisselrelaxatie" w_{cr} tot de spin-roosterovergangswaarschijnlijkheden w_{ij}.

In dit laboratorium hebben we de harmonische wisselrelaxatie voor de frequentieverhouding 2 : 1 onderzocht in robijn en smaragd [3] [4]. We zullen hier echter niet verder op ingaan, maar ons bepalen tot de spin-roosterrelaxatie.

De spin-roosterrelaxatie

Als het paramagnetische ion een grondtoestand heeft die uit slechts twee niveaus bestaat, is het mogelijk één enkele tijdconstante τ_1 — de spin-roosterrelaxatietijd — te definieren, die een maat is voor de snelheid waarmee, na een verstoring van de bezettingen n_1 en n_2, het thermische evenwicht hersteld wordt. Dan is:

$$n_1 - n_2 = \Delta n = \Delta n_0 \, [1 - \exp(-t/\tau_1)] \, , \quad . \quad (4)$$

waarin

$$\tau_1 = \frac{1}{w_{12} + w_{21}} = \frac{1}{w_{12}\,[1 + \exp(hf_{12}/kT)]} \, . \quad (5)$$

De tijdconstante τ_1 kan gemeten worden door de overgang $1 \rightarrow 2$ met een sterke microgolfimpuls van een magnetron of een klystron voor grote vermogens te verzadigen, en het herstel van de evenwichtstoestand te volgen met een paramagnetische-resonantiespectrometer. *Fig. 3* geeft enige in dit laboratorium verkregen resultaten voor Fe^{3+}-ionen in $K_3Co(CN)_6$ [5]. Opval-

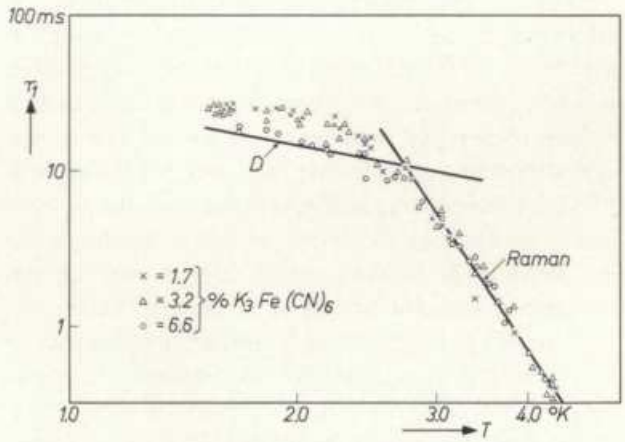


Fig. 3. De spin-roosterrelaxatietijd τ_1 voor het ion Fe^{3+} in monokristallen van $K_3Co(CN)_6$ als functie van de temperatuur *T*. De resultaten illustreren het optreden van de directe relaxatie (*D*) en de indirecte relaxatie (*Raman*) in het eenvoudige geval van een systeem met twee niveaus.

lend hierin is de scherpe verandering in de temperatuurafhankelijkheid van τ_1 bij ongeveer 2,7 °K. Deze kan worden geïnterpreteerd als een overgang van het ene relaxatiemechanisme op het andere. Bij lage temperaturen wordt τ_1 bepaald door het zg. directe proces, waarbij het spinsysteem een enkel fonon met het rooster uitwisselt bij de resonantiefrequentie f_{12}. Theoretisch kan men aantonen dat dit proces een temperatuuraf-

[1] N. Bloembergen, Phys. Rev. **104**, 324-327, 1956.
[2] J. C. Walling en F. W. Smith, De vastestofmaser; principe en toepassing in de communicatie via satellieten, Philips techn. T. **26**, 33-54, 1964/65.
[3] P. T. Squire, Proc. Phys. Soc. **86**, 573-586, 1965.
[4] P. T. Squire en J. W. Orton, Proc. Phys. Soc. **88**, 649-657, 1966.
[5] D. H. Paxman, Proc. Phys. Soc. **78**, 180-184, 1961.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

hankelijkheid $\tau_1 \sim T^{-1}$ geeft, zoals experimenteel ook wordt gevonden. Bij hogere temperatuur gaat het Raman-proces overheersen. Dit is een proces waaraan *twee* fononen deelnemen met een verschil in frequentie gelijk aan f_{12}, en men kan laten zien dat τ_1 dan veel sterker van de temperatuur afhangt: voor het hier beschouwde geval moet $\tau_1 \sim T^{-9}$ zijn. De snelle toeneming van de spin-roosterrelaxatie bij hogere temperatuur is een van de redenen om masers bij lage temperatuur te laten werken; naarmate τ_1 kleiner is, is het moeilijker om de pompniveaus te verzadigen.

In een systeem met meer niveaus — zoals b.v. de grondtoestand van Cr^{3+}, die vier niveaus heeft — is het *niet* mogelijk het relaxatieproces met één relaxatietijd te beschrijven. Is ten tijde $t = 0$ een van de niveauparen verzadigd, dan verloopt het herstel van het thermisch evenwicht volgens een uitdrukking van de vorm:

$$\Delta n = \Delta n_0 \,[1 - A_1 \exp(-t/\tau_1) - A_2 \exp(-t/\tau_2) - \\ - A_3 \exp(-t/\tau_3)], \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (6)$$

waarin zowel de tijdconstanten τ_i als de amplitudes A_i afhangen van de w_{ij}. Het is duidelijk dat de w_{ij}-waarden niet met een enkele relaxatiemeting bepaald kunnen worden, en om verder te komen moet men de theorie te hulp roepen. Als men aanneemt dat het directe proces werkzaam is, kan men aan het werk van Van Vleck [6] theoretische uitdrukkingen voor de w_{ij} ontlenen, en daarmee kan men het relaxatiegedrag voor een bepaald geval voorspellen. Het is moeilijk om numerieke waarden precies te berekenen, maar relatieve waarden zijn voldoende om de maserinversie te berekenen (zie verg. 2), en om bij voorbeeld de temperatuurafhankelijkheid van de relaxatie te voorspellen.

Fig. 4 geeft een reeks resultaten voor Cr^{3+} in zinkwolframaat [7]. Het Cr^{3+}-ion heeft hier een grote nulveldsplitsing; daardoor zijn de vier niveaus van de grondtoestand voor magneetvelden van enkele kilooersteds of minder gegroepeerd in twee zwak gesplitste paren, het zg. onderste en bovenste doublet. Voor elk van deze doubletten hebben we een effectieve relaxatietijd gemeten; deze zijn als experimentele punten in fig. 4 weergegeven. De curven zijn theoretische voorspellingen. Bij elk doublet is een getrokken en een gestreepte curve gegeven; deze corresponderen met verschillende gedeelten van de herstelkromme (die immers niet zuiver exponentieel is). De redelijke overeenstemming tussen theorie en experiment doet veronderstellen dat de berekende w_{ij}-waarden in ieder geval goede eerste benaderingen zijn. Een dergelijk onderzoek is ook uitgevoerd voor Cr^{3+} in smaragd [4].

Met de berekende w_{ij}-waarden werd de inversieverhouding ($I = -\Delta n$ (pomp aan)/Δn (pomp uit)) voorspeld voor een bepaald werkpunt in Cr^{3+}-$ZnWO_4$. Vergelijkt men dit met de experimentele resultaten, dan vindt men een redelijke overeenstemming wat de temperatuurafhankelijkheid betreft, maar het ziet ernaar uit dat de relatieve w_{ij}-waarden wel 50% fout kunnen zijn. Gezien de moeilijkheid van het onderzoek mag dit toch niet als een onbevredigend resultaat beschouwd worden.

Gelijksoortige pogingen om het relaxatiegedrag van Cr^{3+} in robijn te voorspellen — ondernomen door Donoho [8] en, onafhankelijk van hem, in dit laboratorium [9] — hebben aanzienlijk minder succes gehad: bij slechts één of twee van de vele robijnkristallen waaraan gemeten is, vertoonden de meetresultaten een redelijke overeenstemming met de theorie, en er is nog veel dat niet begrepen is. Het is wel paradoxaal dat dit juist het geval is voor robijn, het meest gebruikte masermateriaal.

Samenvattend kunnen we zeggen dat in die gevallen waarin de concentratie van paramagnetische ionen laag is en waarbij slechts twee energieniveaus betrokken zijn, de gebruikelijke spin-roosterrelaxatietheorie relaxatietijden voorspelt die in redelijke overeenstemming zijn met de experimentele resultaten. In een

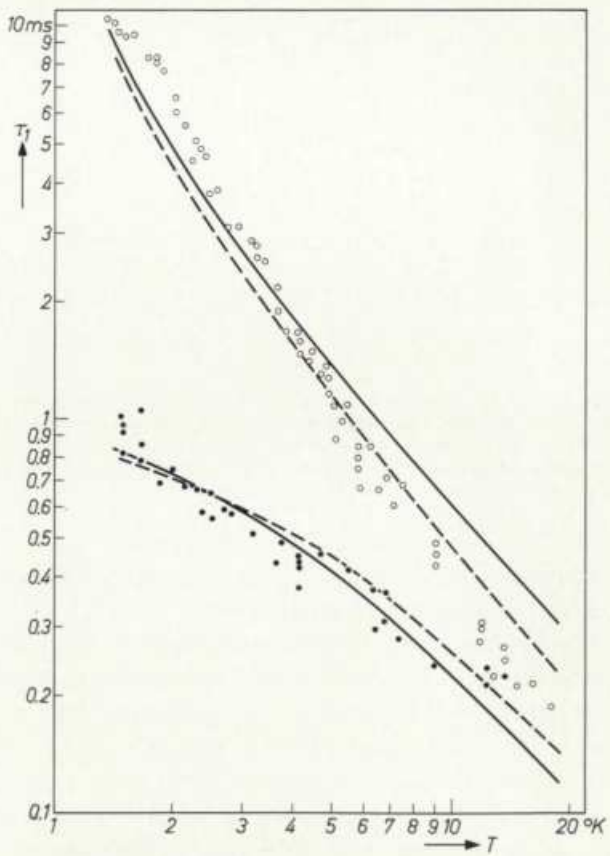


Fig. 4. De temperatuurafhankelijkheid van de relaxatie van Cr^{3+} in zinkwolframaat. In dit geval is er een grote nulveldsplitsing; de niveaus van de grondtoestand vormen twee zwak gesplitste paren, het onderste en het bovenste doublet (respectievelijk corresponderend met de cirkeltjes en de stippen). De getrokken en de gestreepte curven zijn theoretische voorspellingen voor verschillende stukken van de herstelkromme.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

bruikbaar masermateriaal leiden de aanwezigheid van meer niveaus en de hogere ionenconcentraties echter tot complicaties die een theoretische voorspelling moeilijk maken.

Het hier besproken werk is een nuttige stap naar een beter begrip van de relaxatieverschijnselen in masermaterialen, maar er zal nog veel werk moeten worden verzet voordat deze volledig kunnen worden begrepen.

[6] J. H. Van Vleck, Phys. Rev. **57**, 426-447, 1940.
[7] J. W. Orton, A. S. Fruin en J. C. Walling, Proc. Phys. Soc. **87**, 703-716, 1966.
[8] P. L. Donoho, Phys. Rev. **133**, A1080-1084, 1964.
[9] P. T. Squire en J. W. Orton, niet gepubliceerd.

Samenvatting. De prestaties van een maser worden bepaald door de bereikbare bezettingsinversie van een tweetal niveaus. Deze parameter is afhankelijk van relaxatieprocessen in het materiaal, zoals de spin-roosterrelaxatie en de wisselrelaxatie (cross relaxation). Fe^{3+} in $K_3Co(CN)_6$ en Cr^{3+} in $ZnWO_4$ dienen ter illustratie van de overeenstemming die mogelijk is tussen theorie en experiment betreffende de spin-roosterrelaxatie. Voor Cr^{3+} in $ZnWO_4$ zijn de berekende relaxatietijden met redelijk succes gebruikt om inversieverhoudingen te voorspellen.

Onderzoek van de anomale diffusie van doteringen in silicium

K. H. Nicholas

Diffusie van elementen van groep III en van groep V in silicium vormt een fundamenteel onderdeel van de fabricage van planaire schakelingselementen en geïntegreerde schakelingen. Gebleken is dat deze diffusieprocessen een aantal anomalieën vertonen, die belangrijke praktische consequenties kunnen hebben. In dit artikel wordt een mogelijke verklaring van deze anomalieën naar voren gebracht.

De toegepaste experimentele techniek

De verdeling van de in silicium gediffundeerde doteringen kan men als volgt bepalen [1]. Door anodische oxidatie van het silicium en door wegetsen van het gevormde oxide wordt telkens een dun, evenwijdig met het oppervlak gelegen laagje verwijderd. De dikte van het verwijderde laagje silicium wordt bepaald uit de interferentiekleur van de oxidelaag. De aldus bepaalde dikte van de verwijderde laag en het bedrag waarmee het geleidingsvermogen na de verwijdering van de laag afneemt in het gedoteerde gebied, leveren ons de doteringsconcentratie in de verwijderde laag. Zo wordt door een herhaaldelijk oxideren, etsen en meten van het geleidingsvermogen het concentratieverloop bepaald van de in het silicium gediffundeerde stoffen. Een voorbeeld van een aldus verkregen doteringsprofiel geeft *fig. 1*.

De nauwkeurigheid van de toegepaste meting van de laagdikte werd gecontroleerd aan de hand van de metingen van het geleidingsvermogen. De hiervoor op verschillende diepten gevonden waarden werden vergeleken met die in een ander deel van hetzelfde stuk silicium, waar het silicium direct door etsen werd verwijderd en waar de diepte gemeten werd met behulp van een interferentiemicroscoop.

K. H. Nicholas, Ph.D., medewerker van Mullard Research Laboratories, Redhill (Surrey), Engeland.

[1] E. Tannenbaum, Solid-State Electronics **2**, 123, 1961; S. Maekawa en T. J. Oshida, J. Phys. Soc. Japan **19**, 253, 1964.

De waargenomen anomalieën

Bij de toepassing van diffusie- en oxidatieprocessen bij de fabricage van planaire schakelingselementen uit silicium heeft men twee anomale diffusieverschijnselen waargenomen. Het optreden van beide verschijnselen hangt samen met de vorming van het emissorgebied van hoge concentratie. De verschijnselen waren:

1) Bij hoge concentraties in het emissorgebied is de diffusie van de doteringen veel sneller dan bij lage concentraties; het profiel dat ontstaat, is niet in overeen-

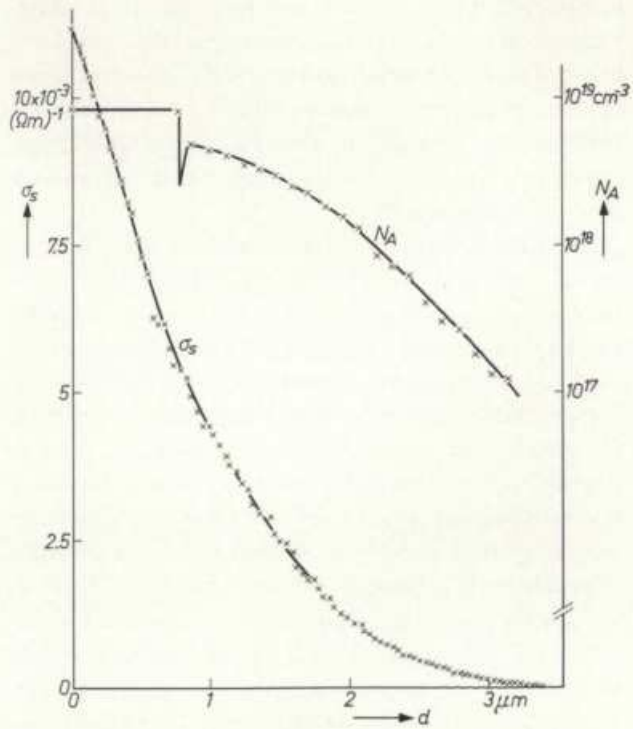


Fig. 1. De vorming van een plateau van constante concentratie door het mechanisch polijsten van een plaatje silicium. Uitgezet is het verloop van het geleidingsvermogen σ_s van een laagje van het plaatje en het verloop van de boriumconcentratie N_A als functie van de diepte d. De bepaling is verricht aan een stuk silicium dat mechanisch beschadigd is door polijsten, na één uur diffusie bij 1200 °C.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

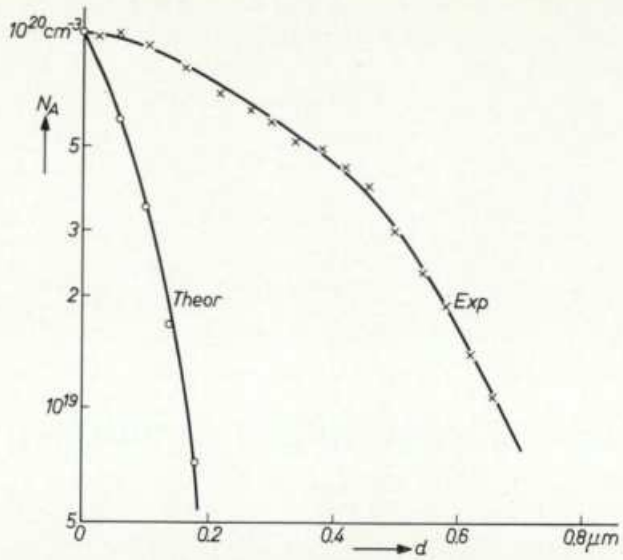


Fig. 2. De snelle diffusie van doteringen bij hoge concentraties. De figuur toont het verloop van de boriumconcentratie N_A als functie van de diepte d na één uur diffusie bij 1000 °C. We zien dat de diffusie bij hoge doteringsconcentraties (curve *Exp*) veel vlugger verloopt dan theoretisch is te verwachten uit waarnemingen bij lage concentraties (curve *Theor*).

stemming te brengen met één waarde van de diffusiecoëfficiënt [1] [2]. Ter illustratie geeft *fig. 2* een verdeling die berekend is met de waarde van de diffusiecoëfficiënt voor lage concentraties (curve *Theor*), en de experimenteel bepaalde verdeling (curve *Exp*). Men heeft een tijd gedacht dat deze anomalie maar schijnbaar zou zijn, en dat de diffusiesnelheid alleen groot zou lijken, doordat de meeste van de gediffundeerde atomen die zich in de buurt van het oppervlak bevinden, elektrisch inactief zouden zijn. Onderzoek met radioactieve indicators heeft echter uitgewezen dat de diffusiesnelheid werkelijk groot is [1].

2) Bij de fabricage van diffusietransistors diffundeert men de emissor in het silicium via een bepaald afgebakend deel van het (grotere) basisoppervlak. Het blijkt nu dat de overgang van basis naar collector in het gebied vóór de emissor in het algemeen verder naar binnen diffundeert dan in het gebied daarbuiten. Men heeft dit verschijnsel veelvuldig waargenomen aan schakelingselementen met dunne basis, b.v. die welke voor hoge frequenties worden gebruikt; daartoe sneed men ze in schijven en vervolgens werden de *P*- en *N*-gebieden door kleuring gelokaliseerd. Men zie *fig. 3*; het verschijnsel is bekend onder de naam „push out"-effect [3].

We hebben nagegaan hoe het concentratieverloop van de dotering er in zo'n geval uitziet (*fig. 4*). Het concentratieverloop in de basis vóór de emissor laat zien dat het beschreven effect een gevolg is van een verhoging van de diffusiesnelheid in dit gebied, en niet van een uitstoting van doteringen uit het emissorgebied.

3) Wij hebben bij recent onderzoek aan mechanisch gepolijste kristallen een derde anomalie gevonden.

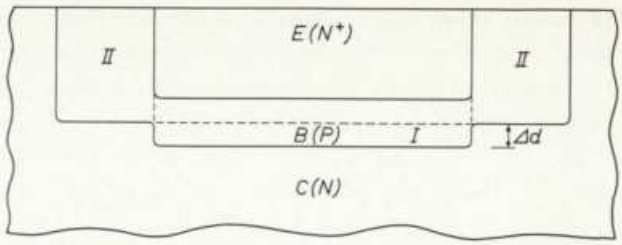


Fig. 3. Doorsnede van een *N-P-N*-transistor die het „push out"-effect vertoont. $B(P)$ is de met borium gedoteerde basis. $E(N^+)$ is de in sterke mate met fosfor gedoteerde emissor. $C(N)$ is de in lichte mate gedoteerde collector. Het gebied *I* is het deel van de basis dat zich bevindt vóór de emissor en dat over een afstand Δd verder is binnengedrongen in het collectorgebied dan het basisgebied *II*.

Fig. 1 vertoont de verdeling van de doteringen na diffusie in een stuk silicium met een mechanisch gepolijst oppervlak. De anomalie blijkt uit het verloop van de boriumconcentratie N_A, dat in de buurt van het oppervlak een horizontaal stuk te zien geeft. De lengte van dit plateau is gebleken evenredig te zijn met de wortel van de diffusietijd, hetgeen aantoont dat het plateau niet eenvoudig een gebiedje is waar het silicium in de buurt van het oppervlak gedeformeerd is.

De experimenten

We hebben eerst onderzocht of deze derde anomalie veroorzaakt wordt door het mechanisch polijsten van het silicium. We hebben daartoe de gepolijste stukken geëtst alvorens ze aan de diffusie te onderwerpen, en daarbij gevonden dat dan zowel de lengte als de hoogte van het plateau klein was (*fig. 5*). Bovendien hebben we vastgesteld dat het, om het plateau geheel te doen verdwijnen, noodzakelijk is ook de achterzijde van het silicium te etsen. Deze waarnemingen zijn een aanwij-

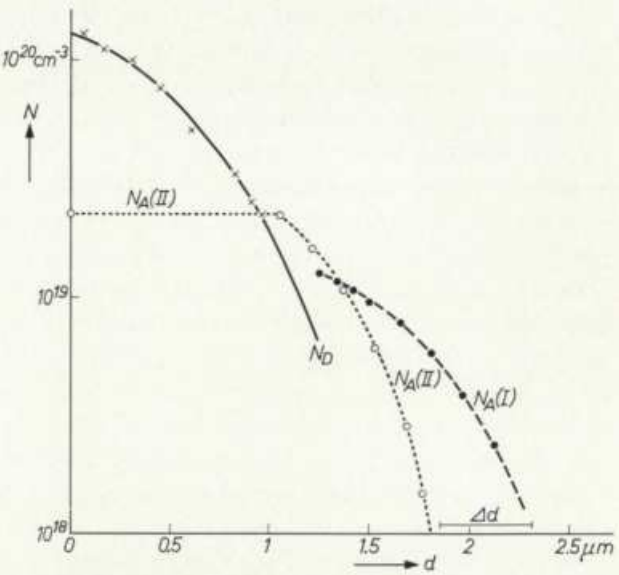


Fig. 4. De doteringsprofielen (verloop van N met d) die beantwoorden aan het „push out"-effect. N_D is het doteringsprofiel in het emissorgebied en N_A (*I*) en N_A (*II*) zijn de profielen in de basisgebieden *I* en *II*. Δd is de diepte van de „push out".

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

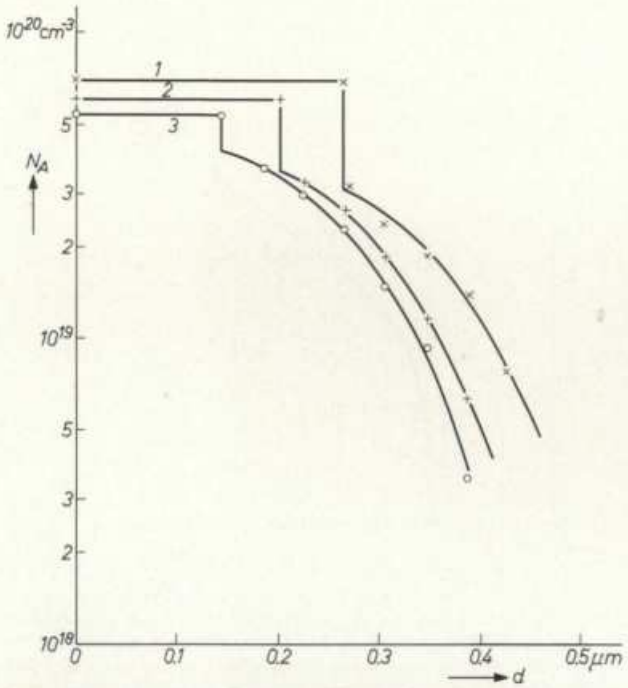


Fig. 5. De vermindering van het anomale effect dat optreedt bij mechanisch polijsten, verkregen door verwijdering van beschadigde gebieden. Curve *1* vertoont het plateau van constante concentratie dat optreedt na diffusie van borium in een mechanisch gepolijst stuk silicium. Curve *2* laat de vermindering in plateaulengte zien die het gevolg is van het wegetsen van een beschadigd laagje van 15 μm voorafgaand aan de diffusie. Een verdere vermindering van spanning door de achterzijde tot een diepte van 80 μm te etsen, reduceert het plateau nog meer, zoals curve *3* laat zien.

zing dat de spanningstoestand van het silicium een belangrijke factor is.

Fig. 6 toont de uitwerking van natte oxidatie op silicium waarin borium is gediffundeerd. Curve *1* is een profiel verkregen door diffusie in een gepolijst stuk silicium, en curve *2* is het profiel dat verkregen wordt indien een zelfde diffusie gevolgd wordt door een vijf minuten durende natte oxidatie bij 1000 °C. Klaarblijkelijk heeft de korte periode van natte oxidatie tot effect gehad dat het gebied van hoge concentratie in de buurt van het oppervlak in snel tempo borium is kwijtgeraakt. Het vermoeden wordt hiermee bevestigd dat de vorming van een plateau verband houdt met de aanwezigheid van een gebied waarin hoge diffusiesnelheden optreden.

Indien men een mechanisch gepolijst stuk silicium gedurende lange tijd aan natte oxidatie onderwerpt (b.v. twee uur lang bij 1200 °C), en men verwijdert de gevormde oxidelaag alvorens de doteringen in het silicium te diffunderen, dan constateert men het volgende. De diffusieprocessen vertonen noch de anomalie kenmerkend voor gepolijst silicium (curve *1*), noch het snelle verlies van borium als gevolg van natte oxidatie (curve *2*). Wat men experimenteel vindt, zijn de profielen *3* en *4* in fig. 6.

Het is bekend dat natte oxidatie na polijsten leidt tot de vorming van dislocaties, hetgeen vermoedelijk gepaard gaat [4] met een ontlading van mechanische spanningen. We hebben zojuist gezien dat een lange periode van natte oxidatie voorafgaand aan de diffusie het anomale karakter van de diffusie doet verdwijnen. Het is dus kennelijk niet de aanwezigheid van dislocaties die de oorzaak is van de anomalie.

De vorming van dislocaties (en de daarmee gepaard gaande spanningsontlading) verloopt bij droge oxidatie heel wat langzamer dan bij natte. Een gepolijst stuk silicium vertoont bij natte oxidatie, zoals we in fig. 6 gezien hebben, een snelle buitenwaartse diffusie van

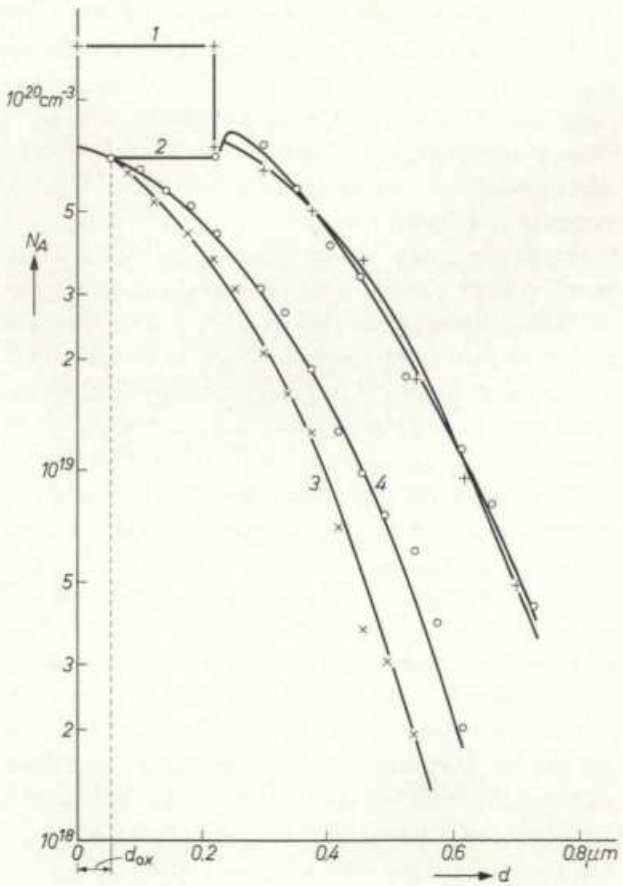


Fig. 6. Het effect van natte oxidatie vóór en na diffusie van borium. Door vergelijking van de curven *1* en *3* ziet men dat de natte oxidatie van het silicium voorafgaand aan de diffusie de anomalie (het plateau) die een gevolg is van het mechanisch polijsten, doet verdwijnen. Aan het verschil tussen de curven *1* en *2* kan men het snelle verlies aan borium zien dat het gevolg is van de natte oxidatie na de diffusie in gepolijst silicium. Uit de vergelijking van de curven *3* en *4* kan men afleiden dat er bij natte oxidatie in afwezigheid van mechanische spanning maar zeer weinig borium verloren gaat. De dikte van de bij de natte oxidatie verwijderde laag is d_{ox}.

[2] V. K. Subashiev, A. P. Landsman en A. A. Kukharskii, Sov. Phys. Solid State **2**, 2406, 1961; P. A. Iles en B. Leibenhaut, Solid-State Electronics **5**, 331, 1962; E. Kooi, J. Electrochem. Soc. **111**, 1383, 1964.

[3] P. Baruch, C. Constantin, J. C. Pfister en R. Saintesprit, Disc. Faraday Soc. **31**, 76, 1961; Y. Sato en H. Arata, Japanese J. appl. Phys. **3**, 511, 1964; R. Gereth, P. G. G. van Loon en V. Williams, J. Electrochem. Soc. **112**, 323, 1965.

[4] H. J. Queisser en P. G. G. van Loon, J. appl. Phys. **35**, 3066, 1964.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

borium; bij droge oxidatie wordt een slechts langzame buitenwaartse diffusie van borium geconstateerd. De toestand van mechanische spanning welke bij droge oxidatie bestaat, veroorzaakt kennelijk geen bijzonder snelle diffusie. De spanningsontlading bij natte oxidatie doet dit wel. Dit wijst erop dat het de spanningsontlading en niet de spanning zelf moet zijn die het aanzijn geeft aan de diffusie-anomalie van mechanisch gepolijst silicium.

De andere twee anomalieën, zowel die welke bij hoge concentraties optreedt als die welke het „push out"-effect teweegbrengt, kunnen op dezelfde wijze worden verklaard. In beide gevallen wordt de spanning veroorzaakt door de hoge concentratiegradiënt van de dotering in het emissorgebied. (Bij het polijsten zijn beschadigingen de oorzaak van de spanning.) De atomen van de dotering passen niet in het rooster en deformeren het derhalve; dat dit leiden kan tot een ontlading van spanning door dislocatievorming is reeds lang bekend [5].

Sato en Arata hebben onlangs dislocaties waargenomen onder de emissor in het „pushed out base"-gebied van een transistorconfiguratie (zie het tweede aangehaalde artikel in [3]). Dit is geheel in overeenstemming met de boven gegeven theorie dat het „push out"-effect toegeschreven moet worden aan de snelle diffusie die optreedt als spanning wordt ontladen door de vorming van dislocaties.

Om aan te tonen dat ook bij de anomale snelle diffusie bij hoge concentraties de oorzaak gezocht moet worden in spanningsontlading, en niet in de spanning zelf, hebben we het volgende experiment uitgevoerd. Een laagje fosfor werd in een inerte atmosfeer op silicium aangebracht. Het silicium werd hierna in enkele stukken verdeeld, waarvan een aantal in stikstof werd verhit en een aantal in vochtige zuurstof. In de stukken die verhit waren in vochtige zuurstof, waarbij een snelle ontlading van spanning was opgetreden, was het fosfor ongeveer vier maal zo snel in het silicium gediffundeerd als in de stukken die in stikstof verhit waren. Spanningsontlading is dus inderdaad de bepalende factor.

De samenhang van spanningsontlading en snelle diffusie verklaart de bijzonder snelle buitenwaartse diffusie van borium die plaatsvindt als sterk gedoteerd silicium aan natte oxidatie wordt onderworpen. Het uittreden van het borium doet, zoals te verwachten is, een profiel ontstaan met een lang plateau op een gemiddeld concentratieniveau. Men ziet zo'n plateau in het basisgebied in fig. 4.

Men zal hiermee ook kunnen begrijpen dat het verlies aan borium een ernstige moeilijkheid vormt voor het maken van de emissors van *P-N-P*-transistors.

Om het effect van spanningsontlading op de diffusie direct te kunnen waarnemen, hebben we ten slotte het volgende experiment uitgevoerd. Een stuk gedoteerd silicium werd in een mechanische spanningstoestand gebracht en gelijktijdig onderworpen aan natte oxidatie bij hoge temperatuur. De dichtheid van de geproduceerde dislocaties werd als maat genomen voor de in het materiaal teweeggebrachte spanningsontlading. In *fig. 7* is de diepte van de *P-N*-overgang van basis naar collector uitgezet als functie van de dislocatiedichtheid. Had de diffusiecoëfficiënt aanvankelijk een zodanige waarde dat de *P-N*-overgang op een diepte van ongeveer 0,5 μm tot stand kwam, als gevolg van de behandeling verplaatste de overgang zich naar veel diepere regionen, zodat tot een sterke toeneming van de diffusiecoëfficiënt kon worden geconcludeerd.

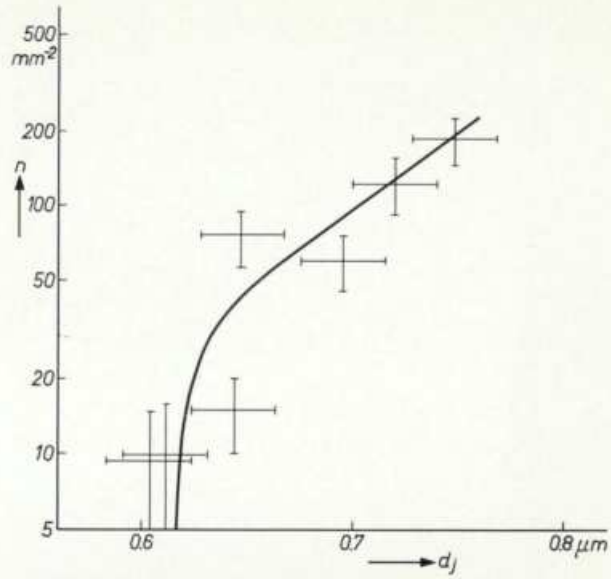


Fig. 7. De *P-N*-overgang van basis naar collector in een *N-P-N*-transistor ligt dieper als er gedurende de diffusie van borium spanningsontlading optreedt. De figuur laat het effect zien van het aanbrengen van mechanische spanning gedurende natte oxidatie van met borium gedoteerd silicium. De diepte van de *P-N*-overgang (d_j) is uitgezet tegen de spanning, waarvoor als maat is genomen het aantal dislocaties per mm² (n).

Bij de fabricage van planaire schakelingselementen is natte oxidatie een veel toegepast proces. Uit het voorgaande mogen we concluderen dat natte oxidatie een belangrijk effect heeft op de verdeling van de doteringen in het silicium. Aan de mogelijke consequenties voor de praktijk is tot dusver nog weinig aandacht geschonken.

Samenvatting. Het diffunderen van doteringen in silicium vormt een onderdeel van de fabricage van planaire schakelingselementen en geïntegreerde schakelingen. Drie anomalieën zijn waargenomen bij dit diffusieproces: er is een (te) hoge diffusiesnelheid gevonden in gepolijst silicium, in silicium met een hoge concentratie aan doteringen en in het gebied vóór de emissor van een siliciumtransistor (het „push out"-effect). Het optreden van de anomalieën wordt verklaard als gevolg van een ontlading van mechanische spanningen en de daarmee verbonden produktie van dislocaties. Er worden een aantal experimenten beschreven waarvan de resultaten deze theorie ondersteunen.

[5] H. J. Queisser, J. appl. Phys. **32**, 1776, 1961; S. Prussin, J. appl. Phys. **32**, 1876, 1961; H. Strack, J. appl. Phys. **34**, 2405, 1963.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Enige toepassingen van contourdepositie

A. F. Beer, J. B. Coughlin en P. J. Daniel

Kort geleden is een nieuw zg. isolatieprocédé voorgesteld voor toepassing in geïntegreerde schakelingen [1]. Dit procédé, dat de naam contourdepositie gekregen heeft, verloopt als volgt. Men etst in het oppervlak van een plaatje silicium een holte en laat daarna epitactisch een laag materiaal op het plaatje groeien die dikker is dan de diepte van de holte. Vervolgens wordt het geheel gepolijst en geëtst tot even onder het oorspronkelijke oppervlak (*fig. 1*). Men verkrijgt aldus in de holte een gebied van epitactisch materiaal, een zg. geïsoleerd gebied, terwijl het oppervlak vlak is, en dus geschikt voor toepassing van de gewone planaire techniek. Desgewenst kan men, door aan het epitactische groeiproces een diffusieproces te laten voorafgaan, gemakkelijk een „begraven laag" aanbrengen. Dergelijke lagen worden in geïntegreerde schakelingen dikwijls gebruikt om een collectorcontact met lage serieweerstand te verkrijgen; in tegenstelling met de conventionele wijzen van isoleren komt zo'n laag aan de rand van het geïsoleerde deel aan het oppervlak.

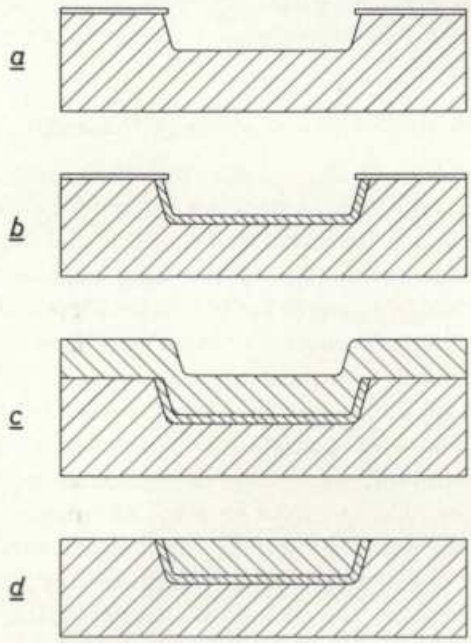


Fig. 1. Contourdepositie. *a*) Er wordt een holte geëtst in een met een oxidelaag afgeschermd plaatje silicium. *b*) Er wordt (desgewenst) door diffusie een „begraven laag" in aangebracht. *c*) De oxidelaag wordt verwijderd en er wordt epitactisch een laag aangebracht. *d*) Het oppervlak wordt vlak geslepen en geëtst. Met dit procédé krijgt men in de oorspronkelijke holte een geïsoleerd gebied van epitactisch materiaal, terwijl het oppervlak vlak blijft.

A. F. Beer, B.A.Sc. Toronto, J. B. Coughlin, B.Sc., en P. J. Daniel, Ph.D., medewerkers van Mullard Research Laboratories, Redhill (Surrey), Engeland.

In *fig. 2* is schematisch een conventionele wijze van het aanbrengen van geïsoleerde gebieden weergegeven. Plaatselijk laat men in een plaatje *P*-silicium een grote hoeveelheid arseen diffunderen, waardoor een N^+-laag ontstaat. Op het oppervlak wordt vervolgens epitactisch een laag *N*-silicium aangebracht. Vervolgens wordt rondom de „begraven" arseenlaag door ondiepe diffusie borium aangebracht (borium fungeert in silicium als acceptor); nadien laat men dit door de epitactische laag heen diffunderen. Op deze wijze ontstaan er geïsoleerde gebieden van *N*-silicium die geheel omringd zijn door materiaal van type *P*. Vergelijking leert dat voor geïsoleerde gebieden zoals men in de praktijk verkrijgt door middel van contourdepositie, de berekende waarden van de capaciteit van de overgang tussen het geïsoleerde gebied en het substraat vier maal zo klein zijn als bij de conventionele methode [1].

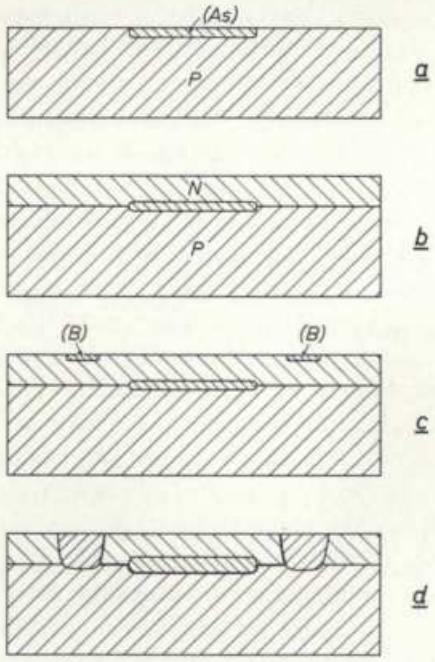


Fig. 2. Conventionele methode voor het verkrijgen van een geïsoleerd gebied. *a*) Een plaatje *P*-silicium wordt plaatselijk door diffusie sterk met arseen gedoteerd. *b*) Op het oppervlak wordt epitactisch een laag *N*-silicium aangebracht. *c*) Rond de „begraven" arseenlaag vindt depositie van borium plaats en vervolgens laat men het borium door de epitactisch aangebrachte laag heen diffunderen. *d*) Het eindresultaat.

Voor het contourdepositie-procédé is een aantal toepassingen voorgesteld. Het doel van dit artikel is het meedelen van enige resultaten die er in de praktijk mee verkregen zijn, met name bij de volgende twee: het maken van zg. complementaire paren MOS-transistors

[1] T. Klein, Solid-State Electronics **9**, 959, 1966.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

van silicium en het maken van geïsoleerde transistors voor ultrahoge frequenties.

Complementaire paren MOS-transistors

Een combinatie van twee MOS-transistors waarvan de ene van het type *P* en de andere van het type *N* is — een zg. complementair paar —, is een nuttig onderdeel van circuits die als schakelaar moeten fungeren, daar zo'n paar een relatief hoge snelheid paart aan een gering energieverbruik. Een MOS-transistor kan men het best maken op een relatief licht gedoteerd siliciumsubstraat. Het opnemen van MOS-transistors van type *P* en type *N* in één geïntegreerde schakeling vereist derhalve in het ideale geval een substraat waarin gebieden van type *P* en van type *N* voorkomen met een acceptor- resp. donorconcentratie van 10^{15} cm^{-3}.

Contourdepositie is de enige methode waarmee men dit kan realiseren; men verkrijgt daarmee gebieden van type *N* in een substraat van type *P*. In ons geval waren de gebieden ongeveer 110×140 μm groot en 10 μm diep. De MOS-transistors van type *N* werden gemaakt in de *P*-gebiedjes door daarin door diffusie toevoer- en afvoerelektrodes (Engels: source en drain) aan te brengen. Deze waren 120 μm lang en 25 μm breed; de tussenruimte was vóór de diffusie 12 μm. De MOS-transistors van type *P* werden op analoge wijze gemaakt door depositie van borium in de gebieden van type *N*.

De diffusie van de doteringen werd uitgevoerd bij 1200 °C in droge zuurstof; bij dit proces, dat een uur duurde, werd tevens de oxidelaag gevormd die de stuurelektrode (Engels: gate) isoleert van het kanaal. Een doorsnee van het geheel dat men aldus verkrijgt, is geschetst in *fig. 3*. Ter verbetering van de stabiliteit van het oxide werd dit bedekt met een laagje fosforglas.

Steeds kregen twee transistors een gemeenschappelijke toevoerelektrode, opdat ze konden worden opgenomen in een eenvoudige, complementaire, bistabiele schakeling. De drempelspanning V_T (d.i. de spanning van de stuurelektrode waarbij er tussen toevoer- en afvoerelektrode stroom gaat lopen) werd op de gewenste waarde gebracht door middel van diffusie van goud; deze instelling was noodzakelijk omdat zowel de MOS-transistors van type *P* als die van type *N* van het zg. verrijkingstype moeten zijn, d.w.z. ze mogen geen stroom voeren als de stuurspanning (ten opzichte van de toevoerelektrode) nul is. Het bleek moeilijk om met deze werkwijze reproduceerbare resultaten te verkrijgen. Karakteristieken van de vier MOS-transistors T_{N1}, T_{N2}, T_{P1} en T_{P2} van één schakeling vindt men in *fig. 4*. In deze figuur is voor ieder van de vier transistors de stroom I_{SD} die van de toevoer- naar de afvoerelektrode vloeit, uitgezet tegen de potentiaal van de afvoerelektrode met als parameter de potentiaal V_g van de stuurelektrode. (V_{SD} en V_g meet men ten opzichte van de potentiaal van de toevoerelektrode.) Ook vindt men in de figuur de drempelspanning V_{T0} en de constante β uit de formule $I_{SD} = \frac{1}{2}\beta(V_g - V_{T0})^2$. De gemeten karakteristieken vertonen goede overeenstemming met die welke men uit de afmetingen van de transistors kan berekenen.

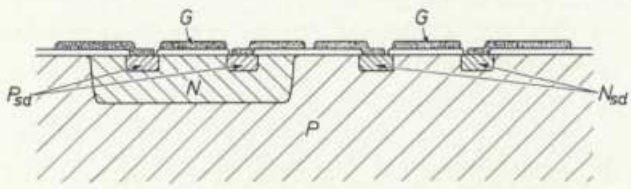


Fig. 3. Doorsnee van een geïntegreerd complementair paar MOS-transistors. De toevoer- en de afvoerelektrode (Engels: source en drain) van type *P* en *N* zijn resp. aangeduid met P_{sd} en N_{sd}. *G* stuurelektrodes (Engels: gate) van aluminium. *N* geïsoleerd gebied van type *N*. Het substraat is van type *P*.

Geïsoleerde transistors voor ultrahoge frequenties

Contourdepositie is geometrisch gunstiger dan conventionele methodes, hetgeen zou moeten kunnen leiden tot een kleinere capaciteit C_{cs} tussen collector en substraat. Het feit dat de „begraven laag" aan de rand van het geïsoleerde gebied aan het oppervlak verschijnt, maakt een kleinere collector-serieweerstand mogelijk of, als men dezelfde weerstand wil accepteren, een kleiner geïsoleerd gebied; dit laat dus een hogere snelheid toe.

Bij de hieronder te beschrijven experimenten waren de door contourdepositie afgezonderde gebieden ongeveer 75 μm×110 μm groot en 8 tot 10 μm diep; het substraat was van type *P* en had een specifiek geleidingsvermogen van 20 tot 40 Ωcm. Er werd gewerkt met begraven lagen van arseen met een laagweerstand van 50 Ω/vierkant. Desgewenst kan men ook kleinere waarden krijgen, en soms kan men, ondanks de hogere diffusiecoëfficiënt, arseen door fosfor vervangen. Het epitactisch aangebrachte silicium was van type *N* met een specifiek geleidingsvermogen van 0,5 tot 1,0 Ωcm.

Onderzoek van de geïsoleerde gebieden met een sonde heeft aangetoond dat in de meeste gevallen de doorslagspanning hoger dan 100 V is, en in 95% van de gevallen hoger dan 50 V. Een latere behandeling kan deze spanningen doen dalen doordat oppervlakdoorslag erdoor bevorderd wordt.

De in de geïsoleerde gebieden gemaakte transistors kwamen geometrisch overeen met de Mullard-transistor BFY 90 voor ultrahoge frequenties, met dit verschil dat het collectorcontact zich hier op het bovenvlak bevond (*fig. 5*). De behandeling kwam in hoofdlijnen eveneens overeen met die van de transistor BFY 90.

De aldus verkregen geïsoleerde transistors hebben eigenschappen die sterk overeenkomen met die van de transistor BFY 90 en zijn niet duidelijk slechter ten gevolge van de wijze waarop de geïsoleerde gebieden

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

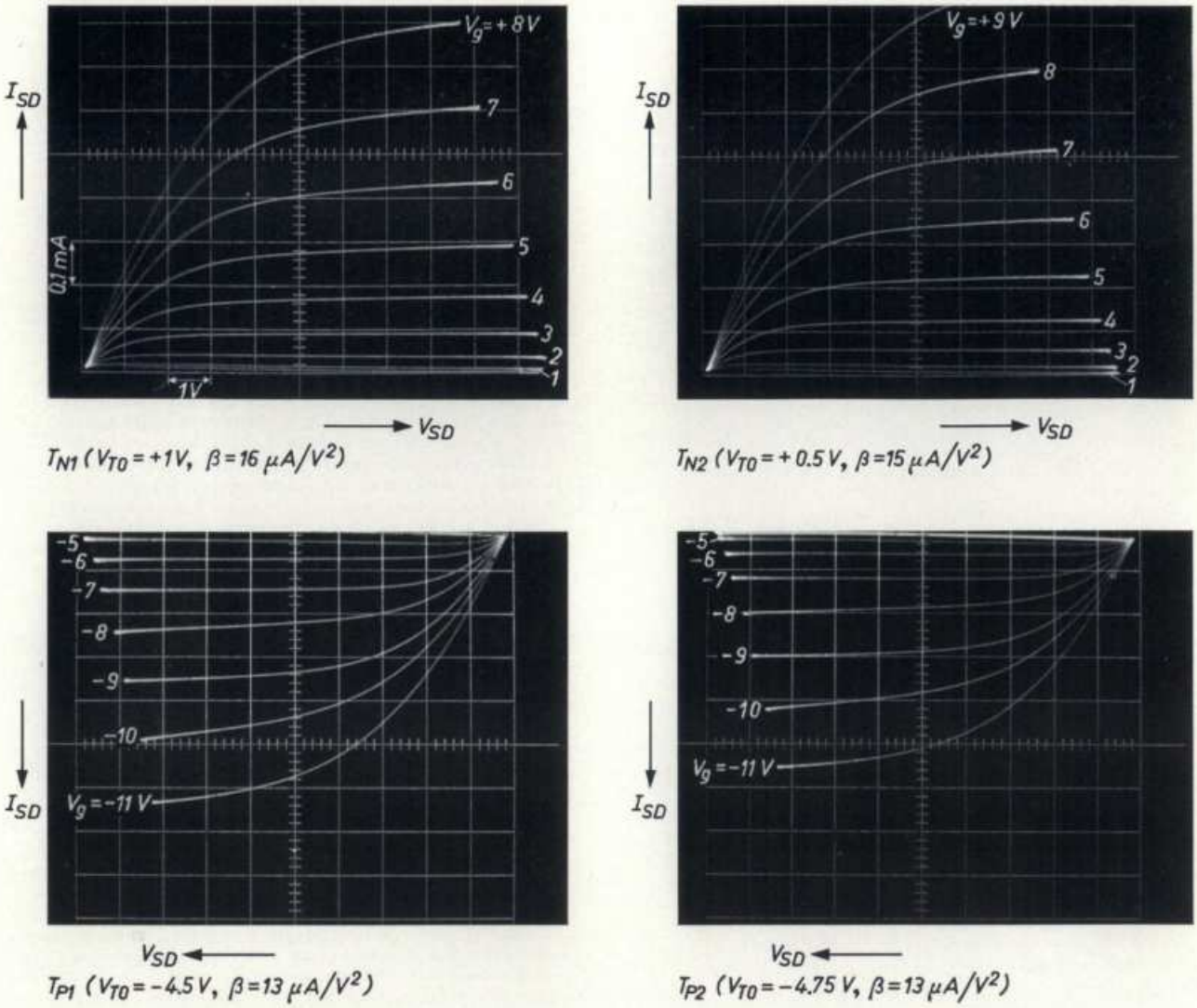


Fig. 4. Karakteristieken van vier MOS-transistors, T_{N1}, T_{N2}, T_{P1} en T_{P2}, behorende tot één schakeling. De stroom I_{SD} die van de toevoer- naar de afvoerelektrode vloeit, is voor ieder van de vier transistors uitgezet tegen de spanning V_{SD} van de afvoerelektrode, met de spanning V_g van de stuurelektrode als parameter. Ook de waarden van de drempelspanning V_{T0} en van de constante β zijn vermeld. De gemeten karakteristieken komen overeen met die welke zijn berekend uit de afmetingen van de transistors.

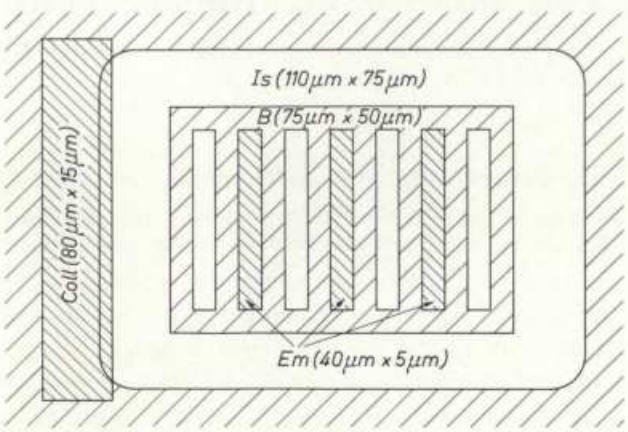


Fig. 5. Geïsoleerde transistor voor ultrahoge frequenties. Deze transistors kwamen geometrisch overeen met de transistor BFY 90 met dat verschil dat ze een collectoraansluiting *Coll* op het bovenvlak hebben. *Is* geïsoleerd gebied. *B* basis. *Em* emissorstroken.

zijn aangebracht. In *tabel I* vindt men waarden samengevat die kenmerkend zijn voor een goed siliciumplaatje.

De capaciteit C_{cs} is ca. 0,3 pF groter dan de berekende waarde, maar dat blijkt het gevolg te zijn van een oppervlakeffect veroorzaakt door het aluminiseren. Ondanks dat is C_{cs} minder dan de helft van wat men bij het conventionele procédé mag verwachten.

De weerstand $r_{cc'}$ kon nog meer verlaagd worden door gebruik te maken van een begraven laag met een kleinere laagweerstand. Bij een zelfde geometrie en een zelfde begraven laag zou toepassing van het conventionele procédé geleid hebben tot een collector-serieweerstand die 50 à 100 Ω groter is, doordat de begraven laag niet aan het oppervlak komt. Om het effect van deze extra-serieweerstand aan te tonen, is er een aantal

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

exemplaren met speciale structuur gemaakt. Deze hadden dezelfde vorm en afmetingen als de transistors die met contourdepositie gemaakt zijn, maar ze waren op normaal epitactisch materiaal van type N of N^+ aangebracht. Voor het doormeten van de transistors konden naar believen het substraat of het bovencontact als collectoraansluiting worden gebruikt. *Fig. 6* toont het verloop van het produkt f_T van bandbreedte en stroomversterking met de collectorstroom I_c voor een zelfde transistor, gemeten met ieder der beide collectoraansluitingen. Bij gebruik van het bovencontact is de versterking aanzienlijk slechter; dat wordt waarschijnlijk niet alleen veroorzaakt door de grootte van de collector-serieweerstand, maar evenzeer door het feit dat een groot deel van deze weerstand vrij ver van de collectorovergang verwijderd ligt. De totale capaciteit tussen collector en basis wordt daardoor vergroot, hetgeen een terugkoppeling veroorzaakt die f_T verkleint.

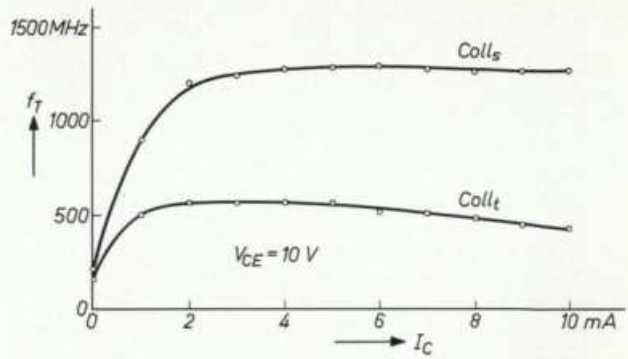


Fig. 6. Het produkt f_T van bandbreedte en stroomversterking uitgezet tegen de collectorstroom I_c voor een spanning V_{CE} van 10 V tussen collector en emissor. Uit de krommen blijkt hoe de versterking afhangt van de keus aan de collectoraansluiting; de curve $Coll_s$ wordt gevonden bij de aansluiting aan het substraat, curve $Coll_t$ bij aansluiting aan het bovenvlak. Bij gebruik van de laatste aansluiting is de versterking veel geringer, wat waarschijnlijk, behalve aan de grootte van de collectorweerstand, ook moet worden toegeschreven aan het feit dat een groot deel ervan zich op grote afstand van de collectorovergang bevindt.

Tabel I. Eigenschappen der verkregen geïsoleerde transistors.

f_T	(produkt van bandbreedte en stroomversterking)	> 1100 MHz (2 mA, 5 V)
$N.F.$	(ruisgetal)	5,5dB (800 MHz, 2 mA, 10 V)
$r_{bb'}$	(basisweerstand)	20 tot 30 Ω
$r_{cc'}$	(serieweerstand van de collector)	100 Ω
C_{eb}	(capaciteit tussen collector en basis)	0,3 pF (10 V)
C_{re}	(terugkoppelcapaciteit)	0,3 pF (10 V)
C_{cs}	(capaciteit tussen collector en substraat)	1,4 pF (10 V) inclusief parasitaire capaciteit van afwerkvlakje (0,3 pF) en bodem (0,5 pF)
BV_{CBO}	(doorslagspanning tussen collector en basis)	30 V
BV_{CEO}	(idem tussen collector en emissor)	20 V
BV_{CSO}	(idem tussen collector en substraat)	50 V

Enige onderdelen van dit werk zijn gedeeltelijk gesteund door het Britse Ministry of Technology.

Samenvatting. Contourdepositie is een werkwijze uit de technologie der halfgeleidende schakelingselementen voor het maken van zg. geïsoleerde gebieden van zeker geleidingstype in een substraat van een ander geleidingstype; de afmetingen en de eigenschappen van deze gebieden heeft men daarbij goed in de hand. Er worden twee toepassingen beschreven op het gebied van geïntegreerde schakelingen op basis van silicium, nl. de vervaardiging van monolitische complementaire paren MOS-transistors en van geïsoleerde bipolaire transistors voor ultrahoge frequenties.

De elektronenmultiplicatorpijp, een nieuwe stralingsdetector

J. Adams en B. W. Manley

De elektronenmultiplicatorpijp is een stralings- en deeltjesdetector die voldoet aan de zeer hoge eisen die bij het ruimteonderzoek gesteld worden: het apparaat kan aan velerlei condities worden aangepast, het heeft een grote gevoeligheid, en het is robuust en eenvoudig [1]. Behalve voor detectie biedt het apparaat ook nieuwe mogelijkheden voor beeldversterking.

De multiplicatorpijp (*fig. 1*) is een multiplicator met continu verdeelde dynodes; hij combineert de functie van het samenstel van dynodes van de conventionele fotomultiplicator met die van de keten van weerstanden waarmee de potentiaal over de afzonderlijke dynodes verdeeld wordt. De multiplicatorpijp bestaat uit een glazen buis waarvan de lengte 50 tot 100 maal de diameter bedraagt; de binnenzijde is bedekt met een zodanig isolerende laag dat de elektrische weerstand tussen de aansluitingen aan de uiteinden een waarde heeft tussen 10^9 en 10^{11} Ω.

J. Adams, B.Sc., en B. W. Manley, B.Sc., D.I.C., medewerkers van Mullard Research Laboratories, Redhill (Surrey), Engeland.

[1] J. Adams en B. W. Manley, Electronic Engng. **37**, 180, 1965.
[2] D. S. Evans, Rev. sci. Instr. **36**, 375, 1965.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

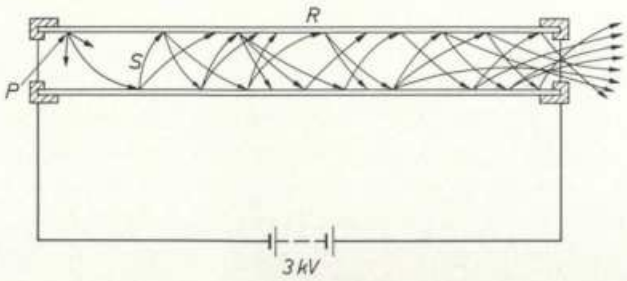


Fig. 1. Een elektronenmultiplicatorpijp. Invallende primaire straling *P* (elektronen, ionen, U.V. en röntgenstraling) aan de laagspanningskant van de buis *R*, doet secundaire elektronen *S* ontstaan. Deze worden telkens in de buis versneld, vermenigvuldigen zich en verlaten de buis aan de hoogspanningskant.

Het apparaat werkt in vacuüm. Tussen de elektrodes wordt een spanning van ongeveer 3000 V aangelegd. Indien het apparaat in de ruimte wordt gebruikt, maakt het aldaar heersende vacuüm een intreevenster overbodig. De korpusculaire en elektromagnetische straling die aan de laagspanningskant invalt, maakt elektronen vrij uit de binnenwand van de multiplicator. Deze elektronen worden door het aangebrachte elektrische veld in de asrichting versneld. Ze treffen de binnenwand na een aanzienlijke hoeveelheid energie uit het veld te hebben opgenomen, en maken daarbij secundaire elektronen vrij. Deze worden op hun beurt versneld, en produceren weer nieuwe secundaire elektronen. Dit proces herhaalt zich langs de gehele lengte van de buis, waarna de vrijgekomen elektronen de buis aan de hoogspanningskant verlaten.

De versterking van de buis hangt af van de aangelegde spanning en van de verhouding tussen de lengte en de diameter, niet van de absolute afmetingen van de buis. De maximaal bereikbare versterking is ongeveer 3×10^8. Bij een dergelijke versterking kunnen de uitgangsimpulsen gemakkelijk worden geteld met de conventionele methodes. De multiplicatorpijp kan gemaakt worden met uittree-openingen waarvan de diameter varieert van enige millimeters tot een fractie van een millimeter. Als men een aantal kleine multiplicatorpijpen parallel rangschikt, zodanig dat hun uittree-openingen een vlak vormen, beschikt men over een geschikt instrument om de stralingsverdeling in een vlak te registreren — zoals b.v. nodig is bij beelddetectie en beeldversterking.

De multiplicatorpijpen kunnen *rechte* buizen zijn, en de kleinere typen hebben gewoonlijk ook deze vorm. De in multiplicatorbuizen optredende tegenstroom van positieve ionen gaat bij rechte buizen van groter formaat bezwaarlijk worden. De positieve ionen ontstaan doordat de elektronenstroom in de buis botst met atomen van het restgas. Deze ionen worden versneld in de richting tegengesteld aan die van de elektronen, bereiken de ingang van de multiplicator en maken daar elektronen uit de wand vrij. Op deze wijze doen de positieve ionen nieuwe uitgangsimpulsen ontstaan. De duur van de periode waarin deze „na-impulsen" worden gevormd, hangt af van de gasdruk en van de afmetigen van de buis. Ten einde de versterking onafhankelijk van de druk te maken, moet men de multiplicators met een diameter groter dan 0,5 mm een zekere kromming geven, waardoor voorkomen wordt dat de positieve ionen de ingang bereiken. Aangezien de positieve ionen over de gehele lengte van de buis versneld moeten worden voor ze voldoende energie verkregen hebben om een merkbaar aantal secundaire elektronen te kunnen vrijmaken, is een geringe kromming reeds voldoende om de drukafhankelijkheid te doen verdwijnen [2]. Men zal de kromming echter vaak sterker maken dan voor dit doel nodig is. Het is immers bijzonder gunstig als men een multiplicator „oprolt" en aldus de ruimte die hij inneemt, verkleint; het is deze overweging die doorgaans de mate van kromming bepaalt.

Fig. 2 toont een serie experimentele multiplicator-

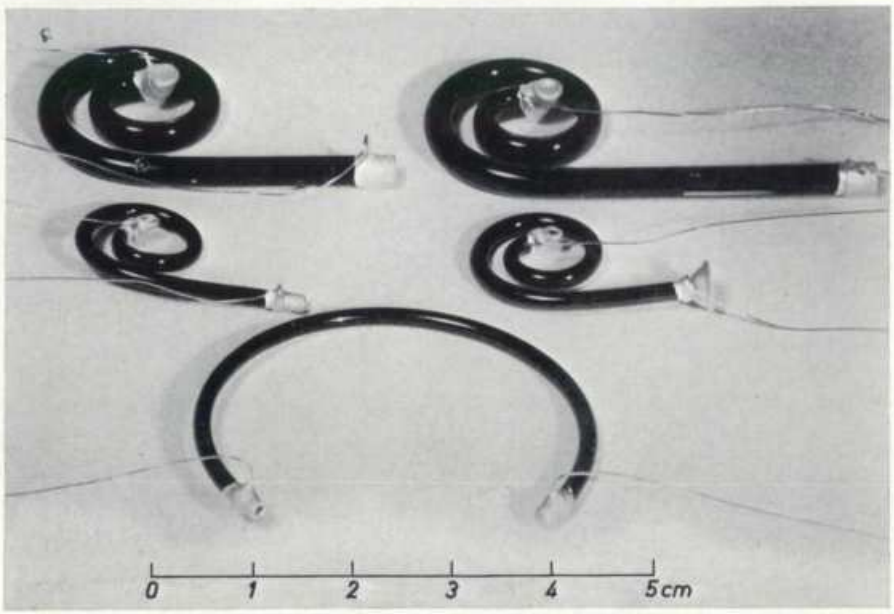


Fig. 2. Een serie multiplicators die in het Mullard-laboratorium gemaakt zijn ten behoeve van het ruimteonderzoek. Bij enkele types is het detecterende oppervlak vergroot door de intree-opening kegelvormig te maken, bij andere is met hetzelfde doel dicht bij de ingangselektrode een spleet in de buiswand aangebracht. De multiplicator Mullard B310, die in de tekst genoemd wordt, is de onderste van de twee spiraalvormige multiplicators links in de figuur. De diameter van de intree-opening is 1,25 mm.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

pijpen, bestemd voor ruimteonderzoek, die gemaakt zijn in het Mullard-laboratorium.

Eigenschappen van multiplicatorpijpen

De versterking G van een gekromde multiplicatorpijp wordt als functie van het potentiaalverschil V_0 tussen de elektrodes in eerste benadering [3] gegeven door:

$$\ln G = \left(\frac{V_0\,\beta^2}{36\,V_{em}}\right)^{1/3} \ln\left\{K\left(\frac{36\,V_{em}\,V_0^2}{\beta^2}\right)^{1/3}\right\}, \qquad (1)$$

waarin eV_{em} de energie is van de secundaire elektronen vlak na de emissie, β de verhouding tussen de lengte en de kromtestraal van de buis, en K de secundaire-emissiecoëfficiënt per elektronvolt energie waarmee de elektronen tegen de buiswand botsen. Er is verondersteld dat K voor alle in een multiplicatorpijp voorkomende elektronenenergieën nagenoeg dezelfde waarde heeft.

Fig. 3 geeft de theoretische versterkingskarakteristiek van een multiplicatorpijp van het type Mullard B310L, te zamen met de experimentele waarden. Er bestaat goede overeenstemming in een versterkingsgebied dat een aantal machten van tien groot is, tot de versterking

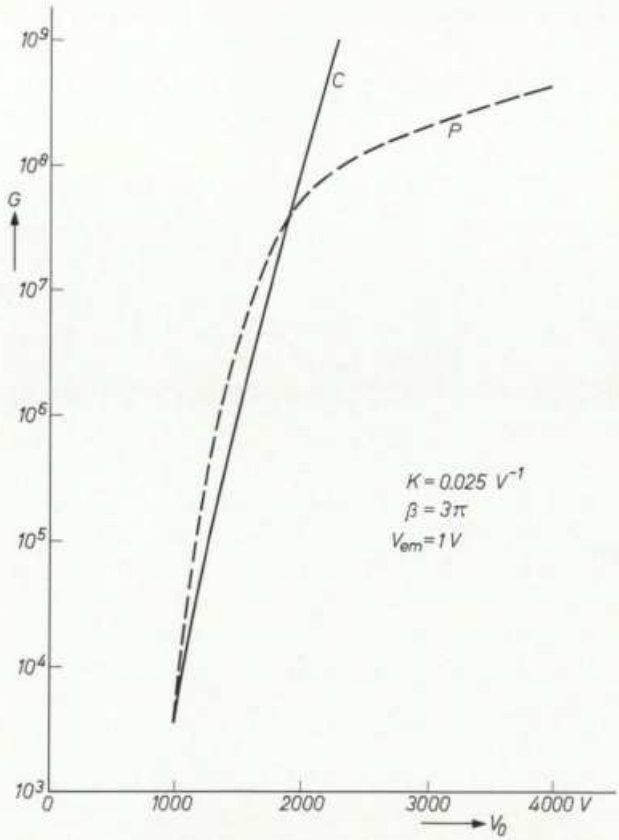


Fig. 3. De elektronenversterking G uitgezet tegen de spanning V_0 tussen de elektrodes bij een multiplicator van het type Mullard B310L. P de experimentele curve; deze vertoont verzadiging als gevolg van de ruimtelading van de elektronen. C de theoretische curve berekend volgens verg. (1), waarbij de parameterwaarden zijn gebruikt die in de figuur zijn opgegeven.

een waarde van ongeveer 10^8 bereikt; daarna treedt verzadiging op. Deze verzadiging zien we bij alle gekromde multiplicatorpijpen bij ongeveer deze zelfde waarde ontstaan. Het verschijnsel is toe te schrijven aan de invloed van de ruimtelading van de elektronen op het elektrische veld in de buis. Naarmate de ruimteladingswolk die het gevolg is van een enkel invallend elektron, verder aangroeit, wordt de snelheid van nieuw gevormde secundaire elektronen in radiale richting sterker afgeremd. Ten slotte bereikt de ladingsdichtheid een zodanige waarde dat de secundaire elektronen weer teruggeworpen worden op de buiswand zonder dat ze voldoende energie verkregen hebben om het aantal elektronen in de wolk te doen toenemen. Deze toestand van dynamisch evenwicht blijft gehandhaafd en de ladingswolk behoudt een constant aantal van ongeveer 3×10^8 elektronen gedurende de verdere gang door de buis naar de uittree-opening.

De impulshoogteverdeling

Het feit dat de ruimtelading in een gekromde multiplicatorpijp een grens stelt aan de maximale hoogte van de uitgangsimpuls die door een invallend elektron veroorzaakt wordt, komt ook tot uiting in de impulshoogteverdeling. *Fig. 4* toont de verdeling die men krijgt met een multiplicator van het type Mullard B310. De breedte van de verdeling (gedefinieerd als de verhouding van de volle breedte op halve piekhoogte tot de versterking op piekhoogte) wordt kleiner als de versterking van 10^7 tot 10^8 toeneemt, om weer groter te worden bij een verdere toeneming van de versterking. De kleinste breedte die men kan verkrijgen, bedraagt ongeveer 0,45, hetgeen vergeleken moet worden met de waarde 1,5 die men bij conventionele multidynode-multiplicators vindt. De minimale piekbreedte in een conventionele multiplicator wordt bepaald door de statistische versterkingsfluctuaties in iedere trap. Dat de multiplicatorpijp een smallere verdeling te zien geeft, is een gevolg van het feit dat de ruimtelading een steeds grotere belemmerende factor voor het versterkingsproces gaat worden wanneer de versterking de waarde van 10^7 overschrijdt.

Het tellen van impulsen met een multiplicatorpijp kan het best gebeuren bij een instelling waarbij de versterking door de ruimtelading bepaald wordt, zodat de impulshoogteverdeling smal is. Men bereikt op deze wijze dat vrijwel alle uitgangsimpulsen de drempelwaarde overschrijden waarboven het telsysteem aanslaat.

De responsiesnelheid

De stroomimpuls die aan de uitgang verschijnt wanneer er één elektron invalt, heeft een duur die afhangt van vorm en afmetingen van de multiplicator en van

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

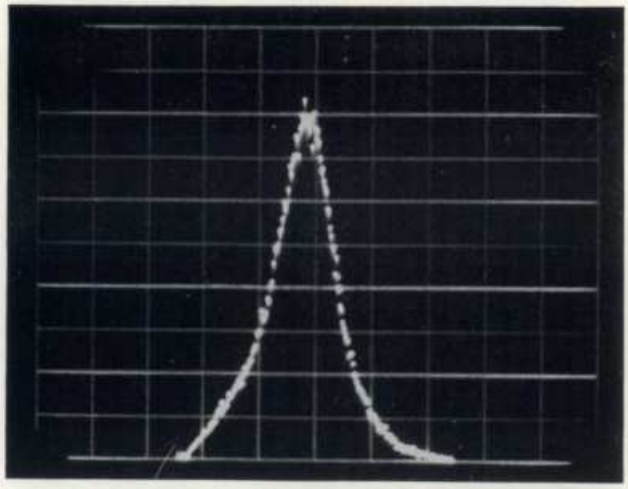


Fig. 4. Een impulshoogteverdeling die karakteristiek is voor een in het verzadigingsgebied werkende multiplicator van het type Mullard B310L. In deze afbeelding van het scherm van een impulshoogte-analysator vindt men langs de abscis en de ordinaat weergegeven resp. de versterking G en de frequentie waarmee een bepaalde versterking optreedt. De top van de verdeling ligt bij een versterking van $2{,}25 \times 10^8$; de breedte is 0,5.

de aangelegde spanning. In een multiplicator van het type Mullard B310 is de stijgtijd van de impuls ongeveer 5 ns en de totale impulsbreedte ongeveer 10 ns.

Aangezien de weerstand van de multiplicatorpijp een eindige waarde heeft, is er na de doorgang van een impuls een zekere herstelperiode, waarin de oorspronkelijke potentiaalverdeling in de buiswand weer tot stand komt. Deze periode van herstel veroorzaakt weliswaar geen „dode tijd", zoals bij een geigerteller, maar ze heeft wel het effect dat als het aantal per seconde invallende elektronen toeneemt, de gemiddelde waarde van de uitgangsimpulsen afneemt. Dat betekent dat er, afhankelijk van de drempelwaarde van het telsysteem, een maximum gesteld is aan het aantal elektronen dat per seconde gedetecteerd kan worden. Deze maximale impulsdichtheid hangt bovendien af van de weerstand van de buis. Zo kan een multiplicatorpijp met een weerstand van $10^9\ \Omega$ bij een drempelwaarde van 2×10^7 elektronen per impuls ten hoogste 10^5 impulsen per seconde verwerken.

De ruis

Een multiplicatorpijp zal van tijd tot tijd uitgangsimpulsen afgeven die niet veroorzaakt zijn door de straling die men erop laat vallen. Deze „valse" impulsen kunnen veroorzaakt zijn door kosmische straling, of door radioactiviteit binnen het experimentele systeem, of ze kunnen in de multiplicator zijn opgewekt door de werking van sterke elektrische velden op onregelmatigheden in het elektronen emitterende oppervlak. Het aantal valse impulsen hangt af van de aangelegde spanning, maar zal in de regel (b.v. bij het type Mullard B 310) niet meer dan één impuls per tien seconden bedragen. Dank zij dit geringe nuleffect kan de multiplicatorpijp bij het detecteren van deeltjesstraling gebruikt worden in een gebied van impulsdichtheden waarvan de grenzen een factor 10^6 uiteen liggen.

De gevoeligheid van multiplicatorpijpen

Elektronenmultiplicatorpijpen zijn reeds gebruikt voor het detecteren van de volgende soorten straling: elektronen met een energie van meer dan 100 eV, positieve ionen met een ongeveer even grote energie, röntgenstraling die bij de diagnostiek wordt gebruikt, zachte röntgenstraling (1-10 nm), en het zg. vacuüm-ultraviolet.

Het detectierendement van een multiplicatorpijp (gedefinieerd als het percentage van de invallende deeltjes of quanta dat detecteerbare uitgangsimpulsen doet ontstaan) hangt sterk af van het type en de energie van de straling. De thans beschikbare gegevens over het detectierendement vindt men in *tabel I.*

Tabel I. Het detectierendement van elektronenmultiplicatorpijpen voor verschillende soorten straling.

soort straling	detectierendement
röntgenstraling voor diagnostiek [4] (60-100 kV, 0,012-0,02 nm)	1%
zachte röntgenstraling [5] (0,8-7 nm)	20%
ultraviolette straling [6] (30-70 nm)	7%
positieve ionen [7] (Li^+ van 1000 eV)	10%
elektronen [7] (450 eV)	60%

De pijpenplaat

Men kan de multiplicatorpijp, zonder dat dit afbreuk doet aan zijn goede werking, zeer verschillende afmetingen geven. Dit maakt het mogelijk om ook kleine pijpen te maken en die te bundelen, zodat men een instrument verkrijgt waarmee informatie in twee dimensies kan worden gedetecteerd, en dat als beeldversterker kan fungeren (punt-voor-punt-versterking). Een dergelijke bundel multiplicatorpijpen, een zg. *pijpenplaat*, maakt men door een aantal afzonderlijke rechte pijpen aaneen te smelten en vervolgens de ingangs- en de uitgangszijde van de verkregen plaat vlak te slijpen. De elektrodes worden aangebracht door aan beide zijden onder een scheve hoek metaal op te dampen. *Fig. 5* toont een vergroting van een gedeelte van

[3] J. Adams en B. W. Manley, IEEE Trans. on nuclear science **NS-13**, no. 3, 88, 1966.
[4] J. Adams, Advances in Electronics and Electron Physics **22A**, 139, 1966.
[5] D. Smith, Leicester University, particuliere mededeling.
[6] R. Speer, Mullard Space Science Laboratory, University College, Londen, particuliere mededeling.
[7] L. A. Frank, University of Iowa Report 65-22, juli 1965.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

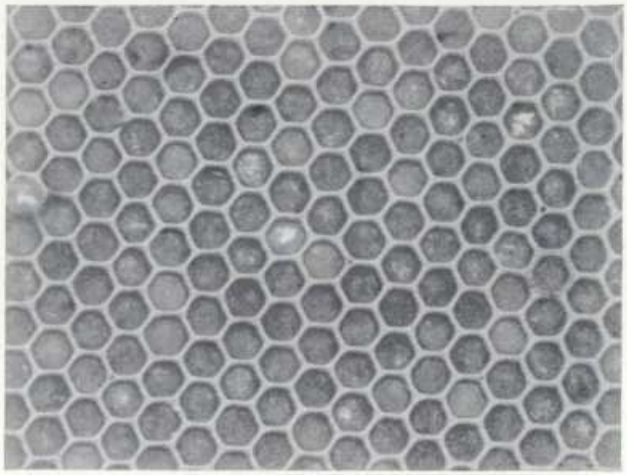


Fig. 5. Gedeelte van een zg. pijpenplaat, die samengesteld is uit multiplicatorpijpen met een diameter van 200 μm.

een pijpenplaat die geschikt is voor beeldversterking. De diameter van de gehele plaat is 10 cm; hij is samengesteld uit pijpen met een diameter van 200 μm.

De verwachting bestaat dat pijpenplaten van dit type zeer bruikbaar zullen blijken te zijn voor het onderzoek naar de zachte röntgenstraling die door de zon en andere stralingsbronnen in het heelal wordt uitgezonden — een onderzoek waarvoor men zich in de astronomie in toenemende mate interesseert.

In de ruimte kan een pijpenplaat gebruikt worden zonder intreevenster. De pijpenplaat heeft een goed rendement voor het golflengtegebied van 1-10 nm (1240-124 eV), waarin men veel stellaire straling vindt. Door zo'n plaat te plaatsen in het brandpunt van een röntgentelescoop die zich aan boord van een kunstmaan bevindt, kan men een versterkt beeld van het röntgenstralingspatroon verkrijgen. Het patroon van de elektronenstroom aan de uitgang kan op een film worden vastgelegd, of met een fluorescerend scherm in een lichtpatroon worden omgezet en met behulp van een televisiecamera naar een grondstation geseind (*fig. 6*).

Elektronenmultiplicatorpijpen zijn gevoelig in het gehele golflengtegebied dat voor röntgendiagnostiek gebruikt wordt, en ook voor hardere straling (van 40 keV tot meer dan 400 keV). Bij deze hoge energieën kan de wisselwerking waarbij een röntgenquantum een foto-elektron produceert, op een zekere diepte in de pijpenplaat plaatsvinden. Doch waar de absorptie van het quantum ook plaatsheeft, het resulterende foto-elektron behoeft altijd maar een kleine afstand in de wand af te leggen om in de pijp vrij te komen. Het detectierendement van dit proces hangt af van het materiaal van de pijpenplaat, en niet zozeer van de röntgenenergie. Bij een geschikt gekozen materiaal kunnen detectierendementen van ongeveer 1% verkregen worden [4]. Dit maakt het mogelijk een röntgenbeeldversterker in de vorm van een vlakke plaat te maken, die bovendien ten opzichte van de conventionele beeldversterker het voordeel biedt dat men een beeld op ware grootte krijgt.

Fig. 7 toont schematisch een met een pijpenplaat uitgevoerde experimentele röntgenbeeldversterker. *Fig. 8* is een röntgenfoto gemaakt van een elektronenkanon,

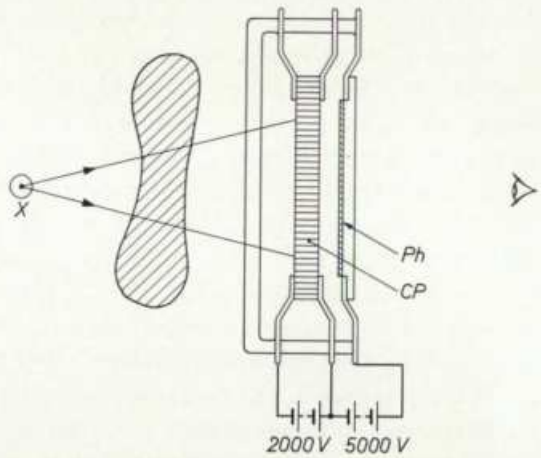


Fig. 7. Schema van met een pijpenplaat uitgevoerde röntgenbeeldversterker. Er is geen fotokatode in het apparaat opgenomen, zoals bij de conventionele röntgenbeeldversterker het geval is. De röntgenquanta worden geabsorbeerd in het materiaal van de pijpenplaat en daarbij omgezet in foto-elektronen. *X* röntgenbron. *CP* pijpenplaat. *Ph* fluorescentiescherm.

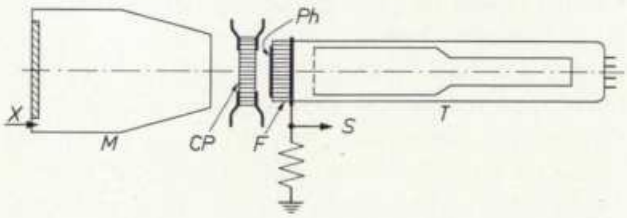


Fig. 6. Ontwerp (schematisch) van een astronomische telescoop voor zachte röntgenstraling. De spiegel *M*, deels een paraboloïde en deels een hyperboloïde, vormt een beeld van de inkomende straling *X* op de ingangszijde *CP* van een pijpenplaat. De aan de uitgangszijde van de plaat verschijnende elektronen worden versneld en vallen op het fluorescentiescherm *Ph*. Dit scherm is aangebracht op het venster *F* met vezeloptiek van de „Plumbicon" buis *T*. Het elektrische uitgangssignaal *S* wordt naar de aarde geseind.

waarbij de röntgenstraling direct op een pijpenplaat werd opgevangen en de vermenigvuldigde foto-elektronen nog eens werden versneld voor ze op het fluorescentiescherm vielen.

Het rendement waarmee de pijpenplaat röntgenstraling detecteert, is aanzienlijk geringer dan het detectierendement van de conventionele röntgenbeeldversterkers. Om hetzelfde rendement te verkrijgen, zou men een röntgenfotokatode vóór de pijpenplaat moeten aanbrengen.

Een dergelijke constructie met een bij het doel aangepaste fotokatode biedt ook goede perspectieven voor de versterking van andere soorten straling.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Conclusies

De bruikbaarheid van elektronenmultiplicatorpijpen wordt thans reeds op ruime schaal bewezen bij het verrichten van metingen aan laag-energetische deeltjes in de bovenste lagen van de atmosfeer. Het feit dat ze klein, eenvoudig en robuust zijn, maakt multiplicatorpijpen uitermate geschikt voor gebruik in de ruimte; men derhalve moeten zoeken naar een materiaal met een grotere secundaire-emissiecoëfficiënt, zodat de verlangde versterking verkregen zal kunnen worden bij een lagere spanning.

De multiplicatorpijp biedt voor diverse stralingssoorten interessante mogelijkheden voor beeldversterking en beeldtransformatie. Het vervaardigen van pijpenplaten met een groot scheidend vermogen stelt een aantal moeilijke technologische problemen, doch worden deze opgelost, dan zal men over een versterker beschikken die zonder elektronenoptische lenzen werkt, klein van afmetingen is, en een hoge fotonenversterking geeft bij relatief lage spanningen.

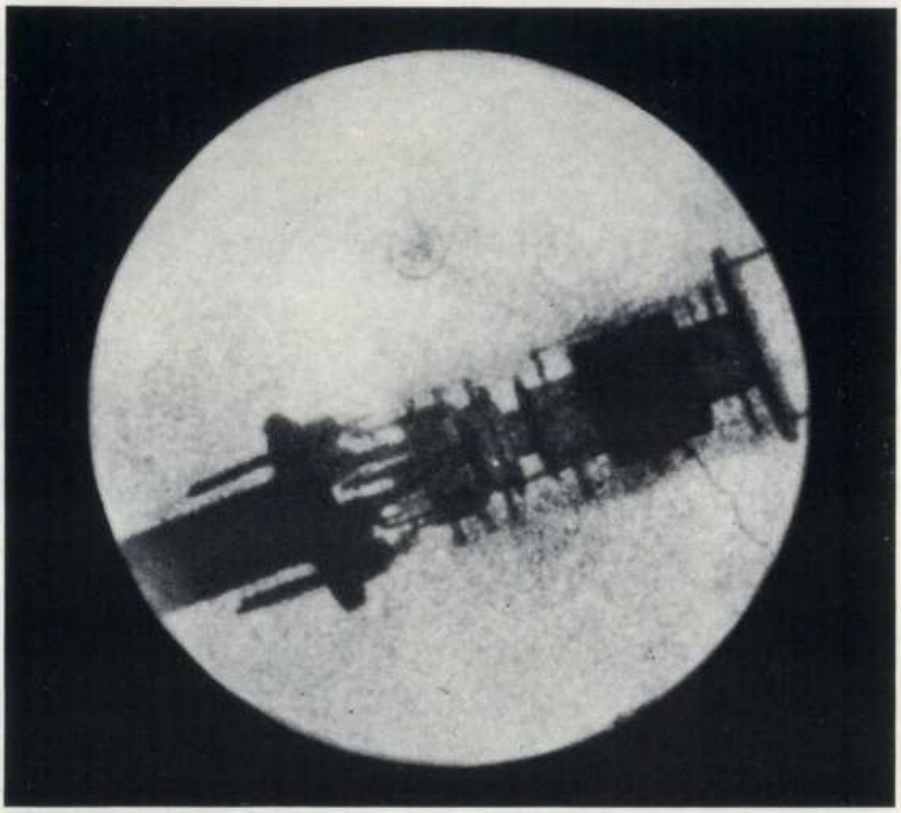


Fig. 8. Een radiogram van een elektronenkanon dat gemaakt is met behulp van een röntgenbeeldversterker van het type dat in fig. 7 is weergegeven. De gebruikte pijpenplaat bestond uit multiplicatorpijpen met een diameter van 200 μm. De diameter van de afbeelding is 8 cm.

voor deeltjes met geringe energie bestaat er vooralsnog geen betere detector. Neemt men in aanmerking dat multiplicatorpijpen gevoelig zijn voor een zeer breed spectrum van energieën — van 100 eV tot meer dan 400 keV —, dan lijkt het waarschijnlijk dat ze ook op andere terreinen toepassing zullen vinden, waarbij speciaal gedacht kan worden aan de detectie van röntgen- en van ultraviolette straling, en aan massaspectrometrie, zowel op aarde als in ruimtelaboratoria.

Men mag verwachten dat de maximaal toelaatbare impulsdichtheid nog verhoogd kan worden. Deze hangt af van de weerstand van de buis. Het apparaat functioneert in zijn huidige vorm bij een spanning van 3 kV tussen de elektrodes; bij een dergelijke hoge spanning zou een verlaging van de weerstand tot beneden $10^8\ \Omega$ tot een ontoelaatbaar hoge energiedissipatie leiden, gezien het feit dat het instrument zijn warmte alleen door straling kwijtraakt. Ten einde de maximaal toelaatbare impulsdichtheid te verhogen, zal

Samenvatting. De elektronenmultiplicatorpijp is een buisvormige multiplicator met continu verdeelde dynodes, die gevoelig is voor elektronen en andere geladen deeltjes en voor stralingsquanta. Bij spanningen van 1000 tot 4000 V kan men met dit type multiplicators versterkingen bereiken die variëren van 10^3 tot 10^8. De multiplicatorpijp kan in allerlei afmetingen worden uitgevoerd, mits de verhouding van lengte tot diameter maar tussen 50 en 100 ligt. Men kan derhalve ook zeer kleine, vensterloze, stralingsdetectors maken waarmee op satellieten de flux van energierijke deeltjes en van kosmische röntgen- en U.V.-straling kan worden gemeten. Afzonderlijke deeltjes kunnen gemakkelijk worden gedetecteerd. Het nuleffect van het instrument is zeer gering. Men kan een groot aantal kleine detectors parallel rangschikken tot een instrument dat geschikt is voor de detectie van stralingspatronen. Deze zg. pijpenplaten kunnen worden gebruikt als versterkend element in röntgentelescopen en er zijn ook toepassingen in de röntgendiagnostiek.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Onderzoek aan beeldtransformators en beeldversterkers

P. Schagen en A. W. Woodhead

Historische achtergrond

De beeldtransformator is een vinding van het Philips-laboratorium te Eindhoven [1], en ook aan zijn verdere ontwikkeling heeft het Philips-concern in belangrijke mate bijgedragen. Het behoeft derhalve niet te verbazen dat dit buistype voor de Mullard Research Laboratories vrijwel vanaf het begin een onderwerp van bijzondere belangstelling is geweest.

Ultrasnelle fotografie

In de jaren 1945-1950 ontstond belangstelling voor de beeldtransformator als elektronische camerasluiter voor ultrasnelle fotografie. Men zocht naar een type sluiter waarbij geen last van mechanische traagheid wordt ondervonden.

De toepassing van de beeldtransformator voor dit doel zullen we toelichten aan de hand van het schema in *fig. 1*. Via het glazen venster van de beeldtransformator wordt de te fotograferen scène afgebeeld op de fotokatode. Het aantal elektronen dat door de fotokatode per oppervlakte-eenheid geëmitteerd wordt, is evenredig met de plaatselijke verlichtingssterkte. Op deze wijze wordt een optisch beeld omgezet in een elektronenbeeld.

De elektronen worden door het elektrische veld versneld, en een elektronenoptische lens focusseert de elektronen van elk beeldelement van de fotokatode op een corresponderend gebiedje van het fluorescentiescherm. Op het fluorescentiescherm wordt de kinetische energie van de elektronen omgezet in licht, en er ontstaat weer een optisch beeld.

De elektronenstroom naar het fluorescentiescherm laat zich goed regelen, enerzijds door het in- of uitschakelen van de spanning van de buis, anderzijds door het opwekken of wegnemen van een potentiaalbarrière ergens in de baan van de elektronen, met behulp van een afzonderlijke elektrode. De sluiterwerking verschilt in wezen niet van die van de conventionele camerasluiter, maar is aanzienlijk sneller.

De eerste buizen waarin deze techniek werd toegepast, waren voor militaire doeleinden ontworpen en waren niet bijzonder geschikt om als sluiter te fungeren. Toch waren de resultaten die hiermee konden worden bereikt bemoedigend genoeg, en er ontstond vraag naar buizen met in dit opzicht betere eigenschappen.

P. Schagen, Ph.D., F.Inst.P., en A. W. Woodhead, B.Sc., medewerkers van Mullard Research Laboratories, Redhill (Surrey), Engeland.

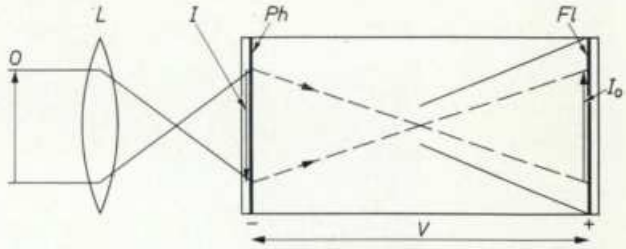


Fig. 1. Schema van een eenvoudige beeldtransformatorbuis. Een voorwerp *O* geeft door middel van de lens *L* een afbeelding *I* op de fotokatode *Ph* van de beeldtransformator. De door de fotokatode geëmitteerde elektronen worden versneld door de spanning *V* over de buis, en vormen een zichtbaar beeld I_o op het fluorescentiescherm *Fl*.

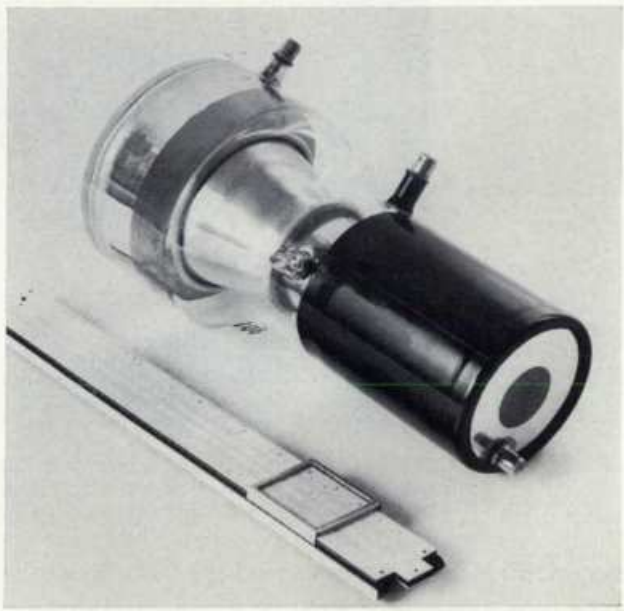


Fig. 2. De Mullard beeldtransformator type ME 1201, ontwikkeld in 1951, die op grote schaal is gebruikt als ultrasnelle fotografische sluiter.

In het Mullard-laboratorium ontwierpen Jenkins en Chippendale een dergelijke buis, gebaseerd op de elektronenoptiek van de toentertijd veel als televisiecamera gebruikte beeldiconoscoop [2]. Het resultaat, de beeldtransformatorbuis ME 1201, ziet men in *fig. 2*. De focussering geschiedde magnetisch, en de buis was uitgevoerd met een afzonderlijke sluiterelektrode. Vergeleken met de buizen die voordien beschikbaar waren, was deze buis eenvoudiger in het gebruik, en hij gaf bovendien een veel betere beeldkwaliteit. Met betrekkelijk eenvoudige middelen konden belichtingstijden tot 10^{-7} s worden bereikt. Met behulp van een speciale techniek konden foto's van een vonk worden gemaakt (*fig. 3*) met een belichtingstijd van 10^{-9} s.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Beeldserie-fotografie

De beeldtransformator ME 1201, toegepast voor enkelbeeld-fotografie, verwierf spoedig een goede reputatie en vele honderden werden in laboratoria over de gehele wereld voor dit doel gebruikt. Toepassing van de buis voor filmopnamen of beeldserie-fotografie stuitte echter op een aantal moeilijkheden, veroorzaakt door de nalichttijd van het scherm en de hoge spanningsimpulsen (3 kV) die nodig waren om de buis te doen werken. Het middel dat men vond om deze moeilijkheden te omzeilen, was het *beeld* te verplaatsen, in plaats van de film — ook de moeilijkheid van een ultrasnel filmtransport omzeilt men op deze wijze. In het speciale geval dat het object in wezen eendimensioneel is, zoals b.v. in de spectrometrie, kan men het beeld met behulp van afbuigvelden over het scherm laten schuiven. Indien de helderheid van het beeld in de tijd varieert, b.v. bij de ontwikkeling van een vonk, neemt men dit op het scherm waar terwijl het beeld zich over het scherm beweegt.

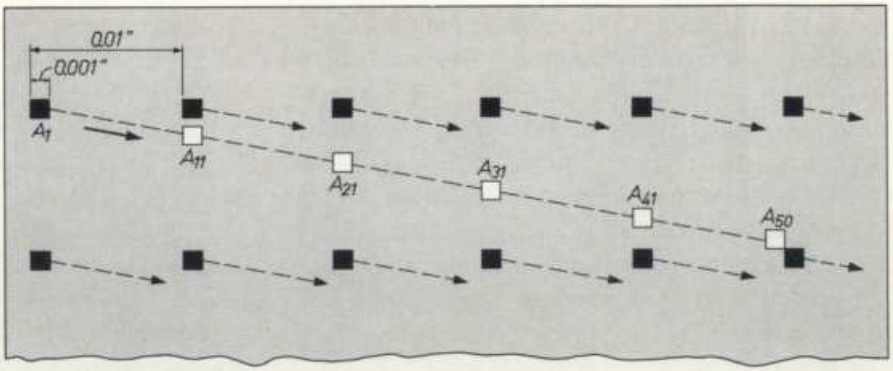


Fig. 4. Beeldserie-fotografie met een buis die het beeld onderverdeelt. De fotokatode bestaat uit een groot aantal vierkantjes met zijden van 25 μm en met tussenruimten van 250 μm; deze vierkantjes nemen dus 1% in van het totale beeldoppervlak. Het elektronenbeeld wordt afgebogen in de richting van de stippellijn. De met A_{11}, A_{21}, A_{31}, A_{41} en A_{50} aangegeven posities corresponderen met de beeldnummers 11, 21, 31, 41 en 50 in de samengestelde opname.

Met wisselend succes werden ook andere methodes voor beeldserie-fotografie met buizen van het type ME 1201 beproefd. Bij een van deze methodes werkte men met een beeld dat slechts een klein gedeelte van het scherm innam. Het beeld werd telkens in zijn geheel naar andere delen van het scherm verplaatst, en op deze wijze kan men een aantal beelden op hetzelfde negatief vastleggen. De sprongsgewijze veranderingen in het magnetische veld die hiervoor nodig waren, maakten deze werkwijze echter minder geschikt voor buizen met magnetische focussering en afbuiging [3].

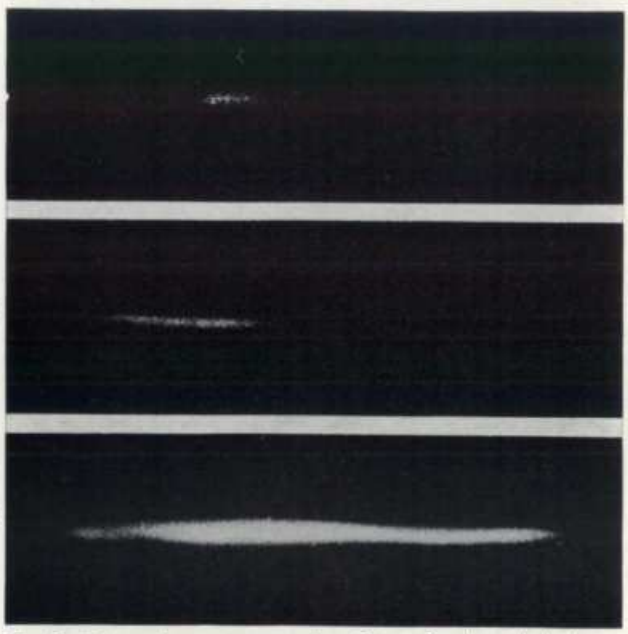


Fig. 3. Het groeien van een vonk, gefotografeerd met behulp van een ME 1201; belichtingstijd 10^{-9} s.
a) Het ontsteken van de vonkontlading, ten tijde $t = 0$.
b) De vonk ten tijde $t = 1{,}3 \times 10^{-9}$ s.
c) De vonk ten tijde $t = 3{,}4 \times 10^{-9}$ s.

Al te abrupte veldveranderingen konden worden vermeden door te werken met een onderverdeeld beeld (Engels: dissected image) [4]. Voor dit doel was de fotokatode uitgevoerd als in *fig. 4* is weergegeven. Het van het beeld afkomstige licht bereikt de fotokatode in een groot aantal afzonderlijke vierkantjes, die slechts ongeveer 1% van de totale beeldoppervlakte beslaan. Door verplaatsing van het elektronenoptische beeld van deze vierkantjes over het fluorescentiescherm verkrijgt men een serie opnamen op hetzelfde negatief. De afzonderlijke beelden kunnen worden bestudeerd door het samengestelde beeld te bekijken door een masker met openingen die corresponderen met de oorspronkelijke beeldpunten van het niet-verplaatste beeld, en dit masker in de verplaatsingsrichting te bewegen.

Fotografische „lichtsterkte"

De werkspanning van de oorspronkelijke ME 1201 bedroeg 6 kV bij een elektronenoptische vergroting van 4 maal. Onder deze omstandigheden was de lumi-

[1] G. Holst, J. H. de Boer, M. C. Teves en C. F. Veenemans, Physica **1**, 297-305, 1934.
[2] J. A. Jenkins en R. A. Chippendale, J. Brit. I.R.E. **11**, 505-517, 1951; J. A. Jenkins en R. A. Chippendale, Electronic Engng. **24**, 302-307, 1952; J. A. Jenkins en R. A. Chippendale, Philips techn. T. **14**, 363-376, 1952.
[3] Kortgeleden heeft Huston met deze techniek buitengewoon goede resultaten verkregen; hij heeft hierbij gebruik gemaakt van de elektrostatisch gefocusseerde buizen met goede beeldkwaliteit die tegenwoordig beschikbaar zijn: A. E. Huston, An image tube camera for photography of plasmas, Appl. Optics **11**, 1231-1234, 1964.
[4] G. H. Lunn, Multiple picture photography with the mosaic cathode image converter, Proc. 3rd int. Congress on high speed photography, blz. 102-107, 1956.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

nantie van het scherm van dezelfde orde als de verlichtingssterkte op de fotokatode. Het beeld op het fluorescentiescherm werd doorgaans in verkleinde vorm op de fotografische plaat vastgelegd met behulp van een goede cameralens die ca. 1% van het uitgestraalde licht opving. Vergeleken met directe fotografische opname was de fotografische „lichtsterkte" van het beeldversterkersysteem dus maar klein. De lichtopbrengst van vele zelflichtende verschijnselen bleek te weinig te zijn voor opnamen met een belichtingstijd van 10^{-6} s.

Ten einde een betere „lichtsterkte" te verkrijgen, werd de werkspanning opgevoerd tot 15 kV. Bovendien werd de elektronenoptiek zo veranderd dat de beeldvergroting continu gevarieerd kon worden tussen 1 en 4 maal. Op deze wijze kon de helderheid van het beeld tot het zestienvoudige worden opgevoerd, zij het ten nadele van de scherpte van het beeld.

Verdere ontwikkeling

Voor sommige toepassingen was de grotere lichtsterkte die op de bovenbeschreven wijze kan worden gerealiseerd, niet voldoende, en het bleek nodig te zijn middelen toe te passen die tot een verdere helderheidsversterking konden leiden. Deze technieken, die nader zullen worden besproken in het volgende hoofdstuk, zijn toegepast in een aantal buizen voor gebruik als fotografische sluiter. Ze zijn ontwikkeld ten behoeve van de Britse Atomic Energy Authority, voornamelijk voor de bestudering van de interactie tussen hoogenergetische deeltjes en materie.

In een van de eerste buizen van deze soort, weergegeven in *fig. 5*, waren in één vacuümruimte twee versterktrappen ondergebracht. Koppelt men twee versterkerbuizen door middel van een lens die het beeld van het fluorescentiescherm van de eerste buis projecteert op de fotokatode van de tweede buis, dan verliest men zeer veel van het licht. Dit is hier vermeden door het scherm van de eerste trap aan te brengen op een dun vlies (b.v. mica met een dikte van minder dan 10 μm), en door aan de andere zijde van het vlies de fotokatode van de tweede trap te deponeren. Op deze wijze kon een zeer grote koppelingsfactor worden verkregen zonder dat de scherpte van het beeld er te zeer op achteruit ging.

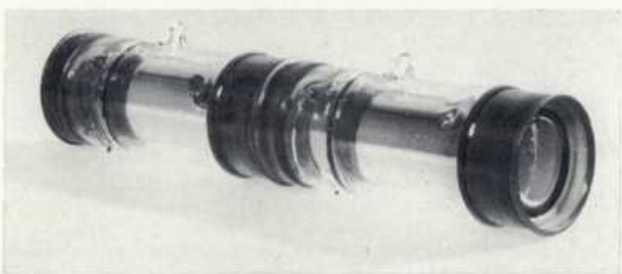


Fig. 5. Een van de eerste typen tweetraps-beeldversterkerbuizen met magnetische focussering.

Deze opstelling is bijzonder geschikt voor elektromagnetisch gefocusseerde buizen, waarin vlakke fotokatodes en schermen gebruikt kunnen worden. Minder gunstig blijkt deze opstelling te zijn voor buizen met elektrostatische focussering. Voor een zo goed mogelijke beeldkwaliteit, speciaal ook aan de randen, zouden bij dit soort buizen de fotokatode en het scherm tegengesteld gekromd moeten zijn.

In de meest geavanceerde van deze buistypen [5] is desondanks elektrostatische focussering toegepast. Dat met dit type buis een aanvaardbare randscherpte kon worden verkregen, is te danken in de eerste plaats aan het feit dat de diameter van de buis veel groter is dan het formaat van het tussenbeeld en in de tweede plaats aan de bijzondere vorm die gegeven is aan de elektrode die om de tweede fotokatode is aangebracht. Een foto van deze buis ziet men in *fig. 6*. De eerste trap had een fotokatode met een diameter van ongeveer 15 cm, die werd afgebeeld op het zeer dunne samenstel van fluorescentiescherm en tweede fotokatode. Het scherm, waarvan de nalichttijd in de orde van microseconden lag, hield het beeld voldoende lang vast om de waarnemer in staat te stellen de verschijnselen die hij wilde vastleggen, uit te kiezen. De tweede trap was voorzien van een afzonderlijke elektrode die als sluiter werkte in een spanningsgebied van enkele honderden volts. Elk van de twee trappen gaf een elektronen-optische verkleining van ca. 3 maal. Deze buis is gebruikt als detector en voorversterker in een opstelling voor het meten van de deeltjesenergie in Nimrod, de 7-GeV-versneller in het Rutherford High Energy Laboratory. Hierbij werd de door de deeltjes opgewekte Cerenkov-straling gemeten [6].

Een project dat omstreeks dezelfde tijd de aandacht vroeg, was de ontwikkeling van een infraroodkijker, voor nachtelijke waarneming met behulp van een infrarood-zoeklicht. De combinatie van het werk aan beeldversterkers en dat aan apparaten voor nachtelijke waarneming leidde vanzelf tot de vraag naar de mogelijkheid van passieve instrumenten voor het zien in het donker, dus zonder aanvullende verlichting. Het is deze toepassing waarop het werk aan beeldversterkers in het Mullard-laboratorium in de laatste jaren in sterke mate is gericht.

Beeldversterkers

Als onderdeel van het onderzoekprogramma voor passieve „donkerkijkers" is een diepgaande studie gemaakt van de punten waarvan men moet uitgaan als men met elektronische hulpmiddelen een beter waarnemingsvermogen wil verkrijgen dan dat van het on-

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

gewapende oog [7]. Dit onderzoek heeft geleid tot de ontwikkeling van een reeks beeldversterkers met verschillende versterkingsfactoren, die gebruikt kunnen worden zowel voor directe waarneming als voor fotografische weergave. Ook kunnen de buizen met een televisie-opneembuis worden verbonden om zodoende op afstand te kunnen waarnemen en om elektronische registratie mogelijk te maken.

De signaal-ruisverhouding

Het waarnemen van een beelddetail bij lage helderheidsniveaus komt er op neer dat men het verschil kan detecteren tussen de aantallen fotonen die gedurende de integratietijd van de detector worden ontvangen van twee naburige beeldelementen. Hierbij ontstaan moeilijkheden als gevolg van het quantumkarakter van het licht. Het aantal quanta dat gedurende één integratietijd van het instrument van een bepaald beeldelement wordt ontvangen, fluctueert nl. in de tijd als gevolg van het statistische karakter van het emissieproces. Uit het helderheidsverschil tussen naburige beeldelementen wordt in de detector een „signaal" gevormd; de statistische fluctuaties in het aantal opgevangen fotonen veroorzaken een op dit signaal gesuperponeerde „ruis". Als de signaal-ruisverhouding te klein is, zal de detector niet in staat zijn het detail in het beeld te herkennen.

Uit deze beschouwing volgt dadelijk dat een instrument alleen dan een verbetering ten opzichte van het waarnemen met het ongewapende oog kan leveren als het een groter deel van de door het object geëmitteerde of gereflecteerde fotonen kan opvangen en detecteren, of als het de gedetecteerde fotonen over een langer tijdsinterval kan integreren.

De visuele „lichtsterkte" van een beeldversterkersysteem

Uit het hierboven behandelde volgt dat drie parameters bepalend zijn voor het waarnemingsvermogen van een instrument:

a) de *effectieve diameter* van de objectieflens; deze bepaalt het aantal door het object uitgezonden fotonen dat wordt opgevangen;

b) het *quantumrendement* van het lichtdetectieproces; dit bepaalt welke fractie van de opgevangen fotonen wordt gedetecteerd;

c) de *integratietijd* van het instrument.

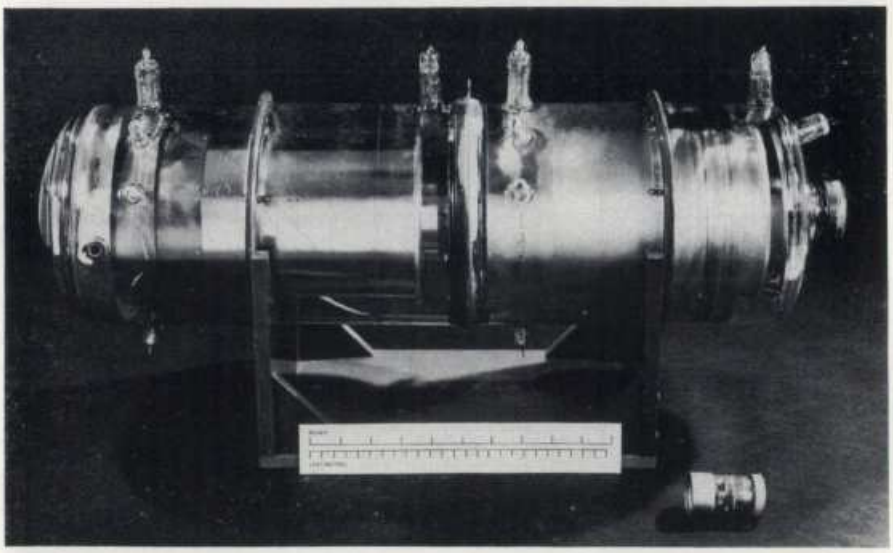


Fig. 6. Tweetraps-beeldversterkerbuis met elektrostatische focussering en sluiterelektrode. Deze buis is gebruikt als detector en voorversterker in een opstelling voor het meten van de deeltjesenergie in de versneller Nimrod (7 GeV) in het Rutherford High Energy Laboratory. Deze meting geschiedde door de door de deeltjes opgewekte Cerenkov-straling [6] te meten. Een voor infrarood gevoelige diode, te gebruiken in actieve systemen voor zien bij nacht, is er ter vergelijking naast gelegd.

De grootste gevoeligheid van het oog wordt bereikt als het volledig aan het donker is aangepast en de pupildiameter de maximale waarde van 7 tot 8 mm heeft bereikt. Het quantumrendement van het oog is dan 1-2% voor „wit" licht, en de integratietijd is ongeveer 0,2 s.

Door een of meer van de drie hierboven genoemde parameters te vergroten, kan men met een beeldversterker een principiële verbetering van het waarnemings-

[5] A. W. Woodhead, D. G. Taylor en P. Schagen, A two-stage electrostatic image intensifier with a large photocathode area, Adv. in Electronics and Electron Phys. **16**, 105-112, 1962.

[6] P. Iredale, G. W. Hinder en D. J. Ryden, IEEE Trans. on nuclear science **NS-11**, no. 3, 139-146, 1964.

[7] P. Schagen, D. G. Taylor en A. W. Woodhead, An image intensifier system for direct observation at very low light levels, Adv. in Electronics and Electron Phys. **16**, 75-84, 1962; P. Schagen, Electronic aids to night vision, Television Soc. J. **10**, 218-228, 1963.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Fig. 7. Volledig beeldversterkersysteem voor het zien bij zeer lage lichtniveaus. Bij gebruik van deze uitrusting kan men voorwerpen herkennen bij zo geringe verlichting dat ze met het ongewapende oog in het geheel niet kunnen worden waargenomen.

vermogen bereiken, een grotere visuele „lichtsterkte" ten opzichte van het aan het donker geadapteerde oog. De parameters kunnen echter in de praktijk niet onbeperkt worden vergroot.

Een verlenging van de integratietijd vermindert het vermogen van het instrument om bewegende voorwerpen waar te nemen, en is om deze reden slechts van beperkte waarde, ook al zou zo'n verlenging voor bepaalde toepassingen buitengewoon nuttig kunnen zijn.

De fotokatode van het multi-alkali-type (S20), met een quantumrendement tot 10% voor wit licht, blijkt in de praktijk de meest geschikte detector voor zichtbaar licht te zijn.

De effectieve diameter van de objectieflens wordt alleen begrensd door praktische overwegingen betreffende afmetingen en gewicht van het instrument, en zal daarom van geval tot geval verschillend zijn.

Het is dan ook mogelijk om vergeleken met het ongewapende oog een zeer aanzienlijke verbetering van de waarneming te verkrijgen door een instrument te gebruiken met een S20-fotokatode, waardoor het quantumrendement bijna een factor 10 groter is, met een zelfde integratietijd als het oog, nl. ongeveer 0,2 s, maar met een zeer groot objectief, dat veel meer fotonen van het onderwerp opvangt dan de pupil van het oog. *Fig. 7* toont een dergelijk instrument zoals het in dit laboratorium is gebouwd. De visuele „lichtsterkte" is hiermee een factor van de orde van 10^4 vergroot. Met dit instrument kan men dezelfde beelddetails waarnemen als met het ongewapende oog, maar dan bij ca. 10^4 maal zo lage helderheidsniveaus.

De fundamentele voorwaarden voor lichtversterking

Nu de optimale met een beeldversterkersysteem bereikbare verbetering van het waarnemingsvermogen is vastgelegd door de drie bovengenoemde parameters, kunnen we de belangrijkste aan zulk een instrument te stellen eis als volgt omschrijven. Het is essentieel dat de informatie die is verkregen door de opgevangen fotonen die fotoelektronen vrijmaken, tijdens de verdere verwerking niet verloren gaat. Dit betekent dat in alle overige delen van het systeem de signaal-ruisverhouding van de gedetecteerde fotonen de beperkende factor moet blijven. Aangezien de beeldinformatie in de regel ook weer in de vorm van een beeld aan de waarnemer wordt overgedragen, betekent deze eis dat in het instrument lichtversterking moet plaatsvinden, de zg. *lumenversterking*. Elk foto-elektron moet op het uiteindelijke beeldscherm een aantal fotonen produceren dat groter is dan een bepaald minimumaantal, om er zeker van te zijn dat minstens één van deze fotonen wordt geregistreerd op het netvlies van het oog van de waarnemer. Dit minimumaantal is afhankelijk van de adaptatietoestand van het oog van de waarnemer

[8] A. W. Woodhead, D. G. Taylor en P. Schagen, Een experimentele beeldversterkerbuis met elektrostatische „Zoom"-optiek, Philips techn. T. **25**, 254-261, 1963.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

en kan uiteraard aanzienlijk worden verlaagd door een vergrotend oculair te gebruiken.

De eentraps-beeldversterkerbuis met regelbare vergroting

Aan de fundamentele voorwaarde die hierboven is gesteld, kan worden voldaan met een eentraps-beeldversterkerbuis indien de naar het fluorescentiescherm kijkende waarnemer donker-geadapteerd blijft. Voor dit laatste is het noodzakelijk dat de helderheid van het scherm beneden een bepaalde grens wordt gehouden. Het hiermee overeenkomende, betrekkelijk nauwe gebied waarin het helderheidsniveau van het oorspronkelijke beeld dan zou moeten liggen, kan echter worden verruimd door de elektronenoptische vergroting in de buis regelbaar te maken [8]. Dit stelt de waarnemer in staat om de foto-elektronen die op het scherm vallen, over een kleiner of groter oppervlak te verdelen, zonder het aantal fotonen te veranderen dat per op het scherm vallend elektron wordt geproduceerd. Wanneer de helderheid van het scherm te groot zou worden voor de juiste donker-adaptatie van de waarnemer, kan deze de helderheid dus verminderen zonder het per foto-elektron opgewekte aantal fotonen te verkleinen. Met andere woorden, de *helderheidsversterking* van de buis kan worden gevarieerd zonder de *lumenversterking* te beïnvloeden. *Fig. 8* toont zulk een buis die in dit laboratorium is ontwikkeld.

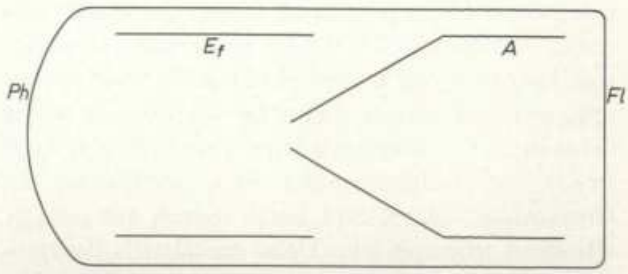


Fig. 8. Schema van een buis met regelbare vergroting die in dit laboratorium is ontwikkeld. *Ph* fotokatode. E_f focusseerelektrode. *A* anode. *Fl* fluorescentiescherm. Als de anode en het scherm op de volle spanning van 15 kV werken, is de buis een gewone triode met vergroting één. Als de anodepotentiaal wordt verlaagd, ontstaat vlak voor het scherm een sterk convergerende lens en wordt het beeld verkleind. Daarbij is een kleine verandering in de spanning van de focusseerelektrode nodig om het beeld op het scherm gefocusseerd te houden. Men kan de vergroting variëren van 1 tot 0,25.

Systemen met een hogere lumenversterking

Men kan ook een zo grote lumenversterking toepassen dat de waarnemer elk foton dat door het detectiegedeelte van het instrument is waargenomen, zal registreren zonder dat zijn oog donker-geadapteerd behoeft te zijn. Men kan dit bereiken door een aantal beeldversterkerbuizen achter elkaar te plaatsen, zoals hierboven werd beschreven. Voor gebruik als donkerkijker zijn buizen met magnetische focussering niet zo geschikt wegens het gewicht en de afmetingen van de vereiste bijkomende onderdelen, en doordat zeer goed gestabiliseerde voedingsbronnen nodig zijn om de juiste focussering te handhaven. Voor deze toepassing geven we dus de voorkeur aan elektrostatisch gefocusseerde buizen. Zoals tevoren reeds werd opgemerkt, is het bij het koppelen van dergelijke buizen wenselijk om het tussenscherm en de fotokatode een tegengestelde kromming te geven. Dit probleem kan worden opgelost door ertussen een koppelelement te plaatsen van vezeloptiek; dit kan dan de meest geschikte vorm krijgen om aan beide zijden goed aan te sluiten. Een tweede moeilijkheid is het aanbrengen van meer dan één fotokatode in dezelfde vacuümruimte. Het is onvermijdelijk dat de fabricage van de buizen hierdoor ingewikkelder en de prijs aanzienlijk hoger wordt. Om deze redenen werd een buis ontwikkeld waarbij het ingangs- en het uitgangsvenster bestaan uit een vezeloptiek met vlakke buitenkant en gekromde binnenkant. Door een aantal van deze buizen achter elkaar te plaatsen met optisch contact tussen de vezeloptieken, kan men de beeldversterking willekeurig groot maken. *Fig. 9* geeft een schematische afbeelding van drie van dergelijke aan elkaar gekoppelde buizen, die te zamen een versterking geven van vele duizenden.

Het belangrijkste voordeel van het toepassen van

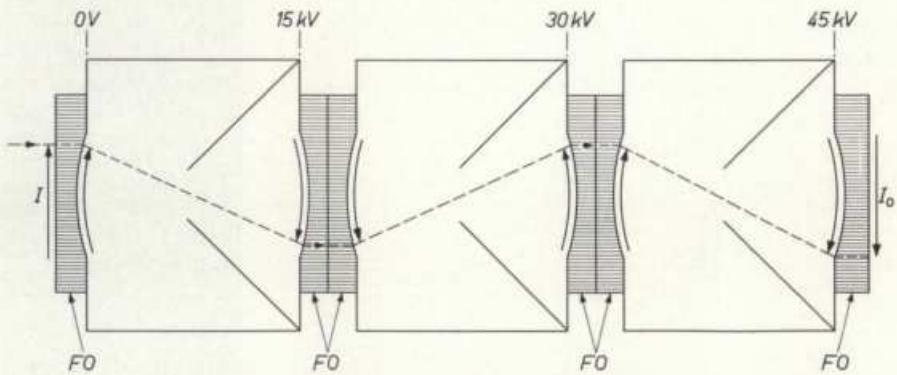


Fig. 9. Schema van drie met vezeloptieken aan elkaar gekoppelde elektrostatische buizen. De ingangs- en uitgangsvensters van vezeloptiek zijn in de figuur met *FO* aangeduid. Elk venster is planconcaaf, zodat aan de voorwaarden voor optimale elektronenbeeldvorming is voldaan en de ingangs- en uitgangsbeelden toch vlak zijn, zodat de buizen gemakkelijk kunnen worden gekoppeld. De stippellijn geeft de optische en elektronenoptische weg die wordt doorlopen bij het afbeelden van een punt van het beeld *I* dat op het ingangsvenster is gefocusseerd, naar het beeld I_o aan de uitgangszijde. Over het geheel van de drie buizen wordt een spanning van 45 kV aangebracht, dus 15 kV over elke trap.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

een grotere lumenversterking is dat hierbij de waarnemer niet meer aan het donker geadapteerd behoeft te zijn. Hierdoor kost het bekijken van het beeld minder inspanning en kan de waarnemer beelddetails sneller herkennen. Het levert echter geen werkelijke verbetering in waarnemingsvermogen op ten opzichte van een eentrapsbuis; het zal zelfs leiden tot een wat geringer scheidend vermogen voor kleine beelddetails, die eventueel met een eentrapsbuis bij een hoger helderheidsniveau nog wèl kunnen worden waargenomen.

De helderheidsversterking van een buizenopstelling zoals in fig. 9 is weergegeven, is ook groot genoeg voor rechtstreekse koppeling aan een televisie-opneembuis, waarbij de fotonenruis nog steeds de beperkende factor blijft.

Momenteel worden in dit laboratorium nog andere methodes onderzocht om een grote helderheidsversterking te krijgen. Een zeer elegante methode maakt gebruik van elektronenversterking met een „multiplicatorpijp", een project waarmee in 1958 in ons laboratorium werd begonnen, onafhankelijk van soortgelijke Russische en Amerikaanse onderzoekingen. Dit werk wordt elders in dit nummer besproken in een artikel van Adams en Manley [9].

Bijkomende onderzoekingen

Het succes van een beeldbuis die is ontworpen om in een bepaald instrument een specifieke taak te vervullen, wordt bepaald door alle onderdelen van het systeem. Deze onderdelen zijn in hoofdzaak onafhankelijk van elkaar. Elk deel zal zijn eigen invloed hebben op de uiteindelijke prestaties van het instrument wat betreft de gevoeligheid, de beeldkwaliteit of beide.

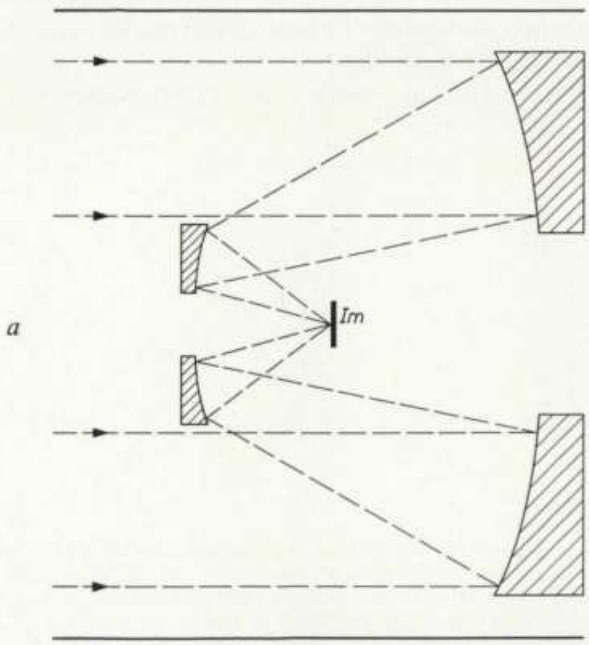
Een onderzoekprogramma voor beeldbuizen moet dus, zodra men zich op een bepaalde toepassing richt, het gehele systeem omvatten. Dit betekent dat men zich niet alleen moet bezighouden met de buisconstructie, de vervaardigingsmethode van de fotokatode, het elektronenoptische ontwerp, en de eigenschappen van het fluorescentiescherm, maar ook met de zuiver optische componenten van het systeem.

In de loop der jaren is in ons laboratorium de mogelijkheid geschapen om op deze verschillende terreinen onderzoek te verrichten; enkele van deze onderwerpen zullen we nu in het kort bespreken.

Het ontwerpen en meten van optische systemen

Voor elk toestel waarmee iets wordt afgebeeld, is het scheidend vermogen een belangrijk kenmerk. De maat voor het scheidend vermogen die in de fotografie gebruikelijk is, het aantal lijnenparen per mm dat nog juist afzonderlijk kan worden waargenomen, wordt voor beeldbuizen meestal niet meer toereikend geacht. De veel meer informatie biedende modulatie-overbrengingsfunctie is ervoor in de plaats gekomen [10]. Deze functie beschrijft de weergave door een instrument van een sinusvormig ingangspatroon met veranderende spoed. Voor een compleet instrument kan deze „frequentiekarakteristiek" eenvoudig worden verkregen door de functies van de verschillende componenten van het instrument met elkaar te vermenigvuldigen.

Een opstelling voor het meten van de modulatie-overbrengingsfunctie van optische onderdelen, van fluorescentieschermen [11] en van volledige exemplaren



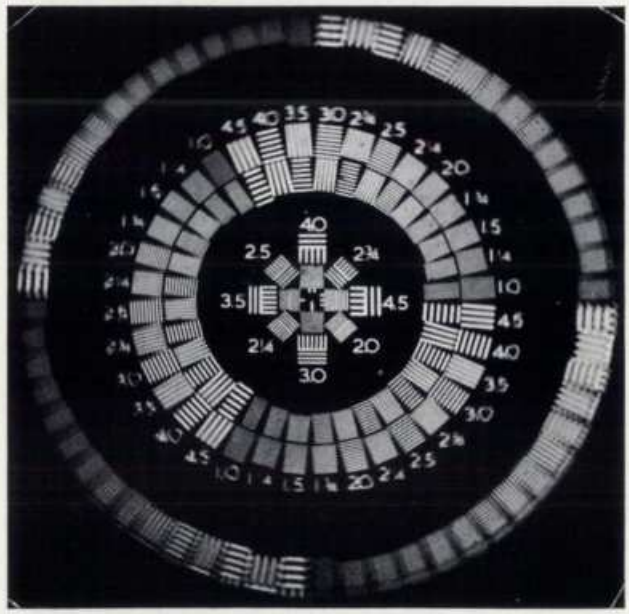


Fig. 10. Een uit twee asferische spiegels bestaand optisch systeem, ontworpen om een grote relatieve apertuur en een plat beeldvlak *Im* te verkrijgen.
a) Schema van de opstelling. *b*) Een met dit systeem in zichtbaar licht gemaakte foto.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

van een beeldbuis, wordt in het laboratorium regelmatig gebruikt.

Voor sommige toepassingen — vooral wanneer het gaat om het transformeren van infraroodbeelden in het golflengtegebied voorbij 2 μm — zijn geschikte objectieven met een grote apertuur en een niet-gekromd beeldvlak moeilijk te krijgen. Dit is het gevolg van het gebrek aan voldoend homogene lensmaterialen met geringe „kleurschifting", die in het genoemde golflengtegebied doorzichtig zijn. We hebben derhalve zelf het ontwerp van een dergelijk objectief ter hand genomen. Het resultaat is een objectief bestaande uit twee asferische spiegels, waarvan de ene een ellipsoïde is. *Fig. 10* geeft een schema van dit systeem en een afbeelding die met behulp van dit objectief is gemaakt met zichtbaar licht. Dit spiegelsysteem kan bij een effectieve apertuur van F : 0,76 een niet-gekromd beeldvlak geven bij een totaal gezichtsveld van 6°. Het scheidend vermogen dat met de eerste uitvoering van het systeem werd verkregen, waarbij de effectieve apertuur kleiner was, nl. F : 1, is weergegeven in *fig. 11*.

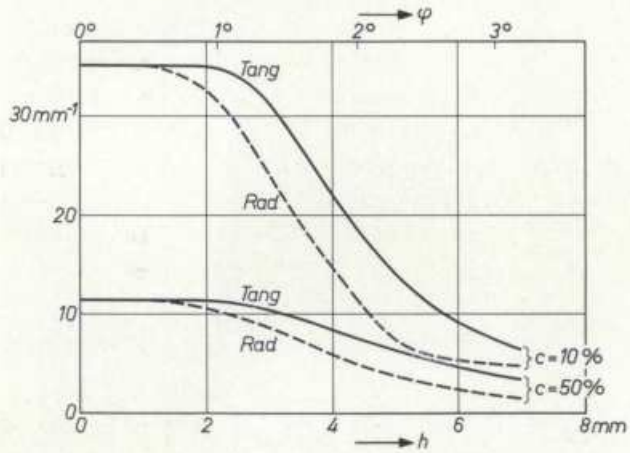


Fig. 11. Grafische voorstelling van het scheidend vermogen dat in de praktijk werd bereikt met een systeem bestaande uit twee asferische spiegels (brandpunt 5", relatieve apertuur F : 1,0). De waarden van de ruimtelijke frequenties (in mm^{-1}) waarbij het beeldcontrast is gereduceerd tot 50% resp. 10%, zijn uitgezet tegen de radiale afstand h tot de as. Hieruit ziet men hoe het scheidend vermogen van het systeem binnen het gezichtsveld varieert. De krommen zijn gegeven voor afmetingen in radiale en in tangentiële richting.

Fotokatodes

De fotokatodes die in de verschillende beeldbuizen worden toegepast, zijn gewoonlijk voor het nabije-infraroodgebied van het type zilver-zuurstof-cesium (S1) en voor de meeste andere toepassingen van het type antimoon-natrium-kalium-cesium (S20). *Fig. 12* toont enkele karakteristieke spectrale gevoeligheidskrommen van deze katodes.

Voor buizen die werden gebruikt als sluiter voor ultrasnelle fotografie, waren gewoonlijk katodes nodig met een lagere inwendige weerstand dan de standaard-

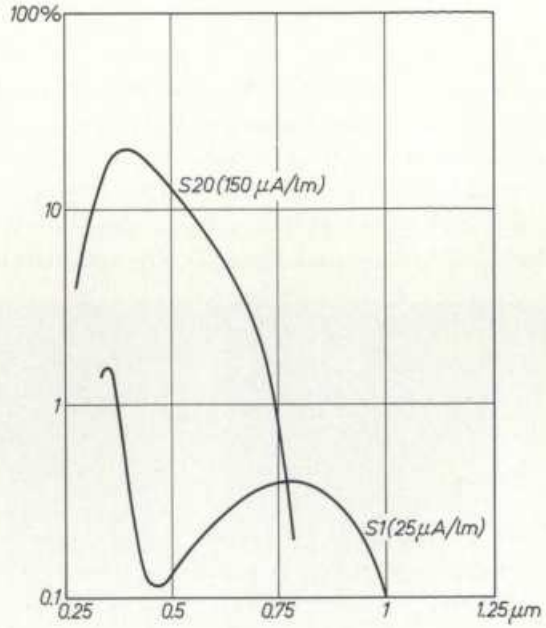


Fig. 12. Spectrale gevoeligheidskromme van een S1- en een S20-katode. Het absolute fotonenrendement (dat is het gemiddelde aantal geëmitteerde elektronen als percentage van het aantal opvallende fotonen van een bepaalde golflengte) is uitgezet tegen de golflengte van de opvallende straling.

katodes, dit om de grote stroomdichtheden te kunnen leveren die vereist zijn voor het werken met zeer korte impulsen. Hiervoor werd een speciale uitvoering van de antimoon-cesium-fotokatode (S11) ontwikkeld, die een aanzienlijk lagere inwendige weerstand heeft dank zij de toevoeging van een zeker percentage palladium aan het antimoon.

De straling van de nachtelijke hemel bevat gewoonlijk een grote hoeveelheid energie in het rode deel van het zichtbare spectrum en in het nabije infrarood; dit wordt veroorzaakt door de nachtelijke uitstraling van de hoogste lagen van de atmosfeer. Door enige wijzigingen in het fabricageproces van de algemeen gebruikelijke S20-fotokatode is de gevoeligheid in dit frequentiegebied vergroot.

Sinds kort is in het onderzoek naar fotokatodes ook de halfgeleider GaAs betrokken. Men probeert halfdoorzichtige lagen van dit materiaal te maken met dezelfde eigenschappen als in het Philips-laboratorium te Eindhoven werden bereikt bij een monokristal [12]. Als men hierin slaagt, kunnen dergelijke katodes of de eruit ontwikkelde types, in bepaalde toekomstige beeldbuizen misschien met succes de S20-fotokatodes vervangen.

[9] J. Adams en B. W. Manley, blz. 256 in dit nummer.
[10] R. L. Lamberts, Application of sine-wave techniques to image-forming systems, J. SMPTE **71**, 635-640, 1962.
[11] D. G. Taylor, The measurement of the modulation transfer functions of fluorescent screens, Adv. in Electronics and Electron Phys. **22A**, 395-405, 1966.
[12] J. J. Scheer en J. van Laar, GaAs-Cs: a new type of photo-emitter, Solid State Comm. **3**, 189-193, 1965.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Elektronenoptiek

De eerste beeldbuizen van het type ME 1201 waren magnetisch gefocusseerd. De reden hiervoor was dat met dit systeem een goede gelijkmatige beeldkwaliteit kon worden verkregen bij gebruik van een vlakke fotokatode en een vlak fluorescentiescherm. De vergroting van deze buis werd regelbaar gemaakt door zeer dicht bij het scherm van de buis een sterk convergerende lens te plaatsen. De vergroting kon dan worden gekozen tussen 0,8 en 4 door de potentiaal van de gewijzigde sluiterelektrode te variëren tussen 1 kV en de volle schermspanning, en het magneetveld daarbij telkens in te stellen op optimale focussering.

Bij elektrostatisch gefocusseerde buizen ging men van hetzelfde principe uit. In dit geval kon men het beeld in optimaal focus houden door regeling van de spanning van een cilindrische elektrode, toegevoegd tussen de fotokatode en de anode [8].

In de vorige paragrafen werden de voordelen van magnetische en elektrostatische focussering tegen elkaar afgewogen. Voor de meeste toepassingen doen de eenvoud, het lage gewicht en de kleine omvang van de voedingsbronnen bij elektrostatische systemen de balans in deze richting doorslaan.

Bijna alle elektrostatische beeldbuizen van de laatste jaren waren gebaseerd op het model van de concentrische bollen [13]. In het ideale geval kunnen hierbij de elektrische velden, en dus de elektronenbanen theoretisch worden berekend. In de praktijk treden afwijkingen van het ideale model op doordat de fotokatode en de anode slechts gedeelten van boloppervlakken zijn, omsloten door een cilindrische omhulling. Dit geeft zodanige randvoorwaarden dat het probleem niet meer exact opgelost kan worden.

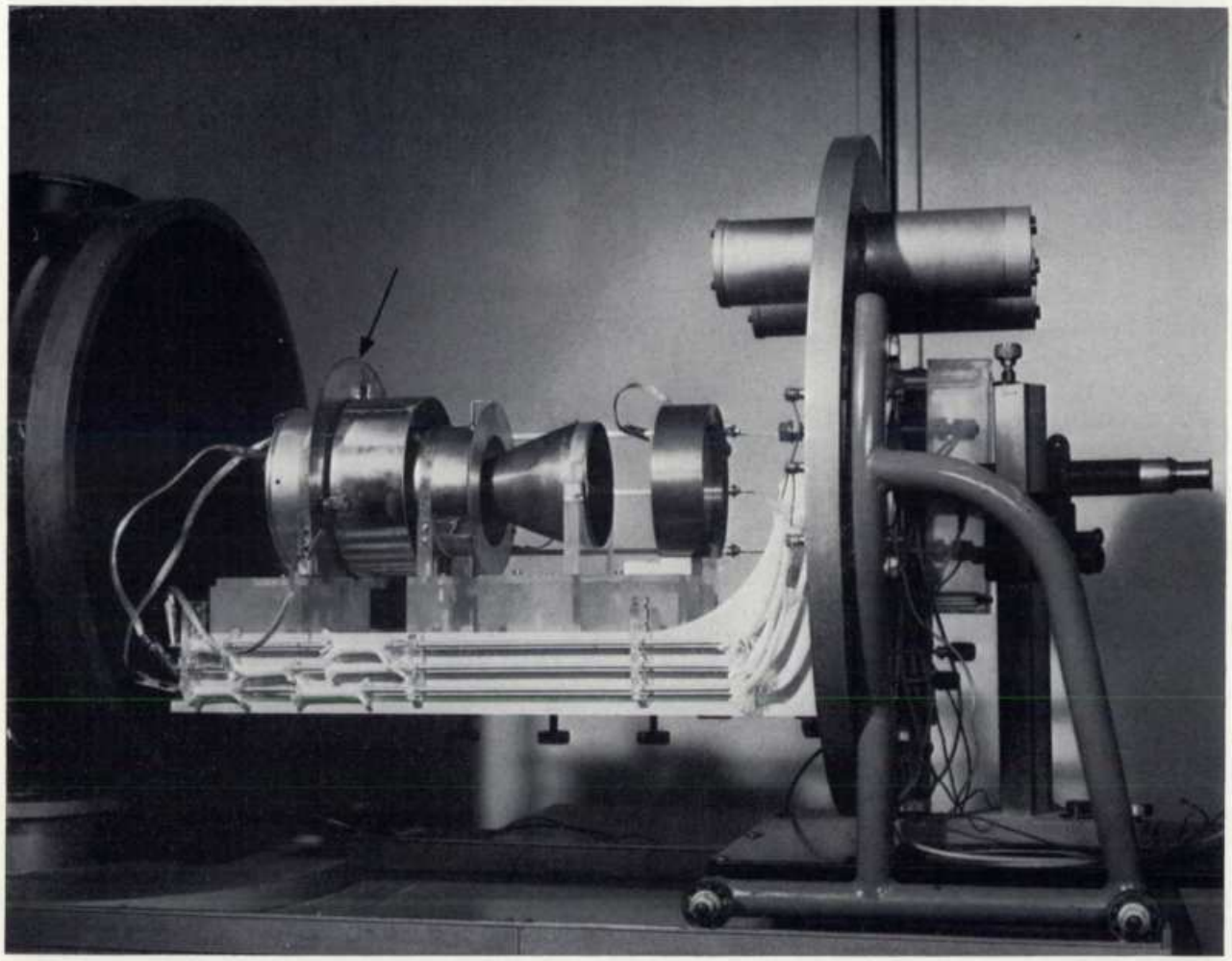


Fig. 13. Demontabele opstelling voor het ontwerpen van elektronenoptische systemen voor beeldtransformatorbuizen. Als nabootsing van de fotokatode is een aantal thermische elektronenbronnen achter een gebogen koperen plaat geplaatst (aangegeven door de pijl). In de plaat zijn kleine gaatjes gemaakt, zodat de elektronen naar de ruimte aan de andere zijde kunnen ontsnappen. Men ziet de elektrodes van een gebruikelijk type elektrostatische beeldbuis. Het fluorescentiescherm, dat een afbeelding geeft van het patroon van de afzonderlijke gaatjes in de katodeplaat, kan door een venster in de achterwand worden bekeken. Deze constructie kan in een vacuümklok worden geplaatst. De buiselektrodes worden van buiten af zodanig ingesteld dat focussering en beeldkwaliteit optimaal zijn.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Het oplossen van deze elektronenoptische problemen kan men op twee manieren aanpakken, nl. met een model of met een elektronische rekenmachine.

Bij de modelmethode wordt de fotokatode voorgesteld door een aantal thermische elektronenbronnen die achter een koperen plaat zijn gemonteerd. In de plaat zijn kleine gaatjes aangebracht, zodat de elektronen naar de ruimte aan de andere zijde kunnen ontsnappen. Dit katodemodel bevindt zich onder een vacuümklok, waar ook de andere elektrodes van de buis zijn geplaatst. Op het fluorescentiescherm, dat door een venster in de klokwand kan worden bekeken, ontstaat een afbeelding van het patroon van de afzonderlijke gaatjes in de katodeplaat. De elektrodes kunnen van buiten af worden verplaatst; ze worden zodanig ingesteld dat de focussering en de beeldkwaliteit voor die bepaalde opstelling optimaal zijn. *Fig. 13* toont een dergelijke opstelling.

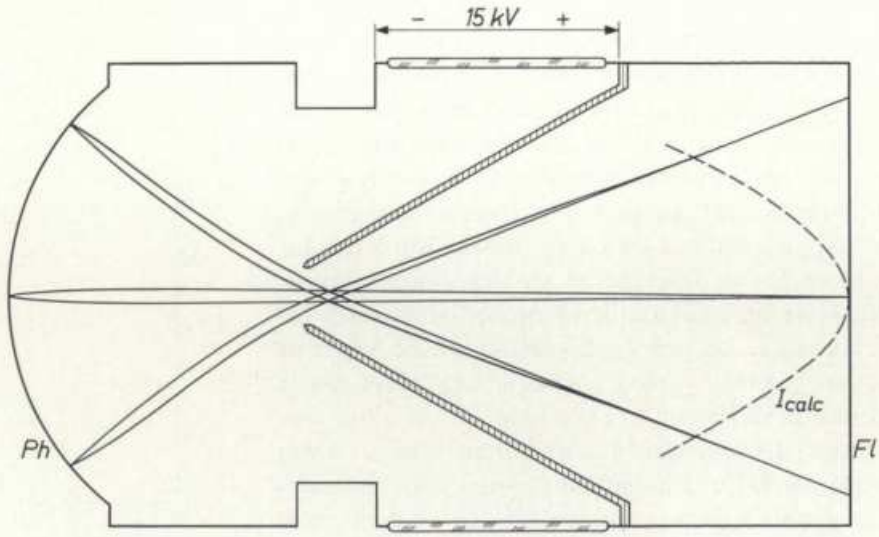


Fig. 14. Elektronenbanen in een gebruikelijk type beeldbuis, berekend met behulp van een rekenmachine. Het berekende beeldvlak I_{calc}, weergegeven door de streeplijn, is gekromd in de richting van de fotokatode *Ph*. Wegens de kleine divergentiehoek van de elektronenbundeltjes is het verlies aan scheidend vermogen aan de rand van het beeld zelfs op een vlak scherm (*Fl*) gering.

Door de ontwikkeling van grote snelle rekenmachines is het tegenwoordig mogelijk elektronenbanen in een beeldbuis te berekenen. De rekenmethodes hiervoor zijn door Weber [14] beschreven en zijn in de laboratoria van Philips en Mullard tot een hoge graad van nauwkeurigheid ontwikkeld. *Fig. 14* toont enkele berekende elektronenbanen in een bepaald type beeldbuis. Men ziet dat het beeldvlak gekromd is in de richting van de fotokatode. De elektronenbanen vertonen voorbij het beeldvlak slechts een zeer geringe divergentie. Hierdoor is de randscherpte op een vlak scherm dat op de in de figuur aangegeven wijze is geplaatst, voor de meeste toepassingen nog zeer acceptabel. De techniek van het berekenen van elektronenbanen is niet alleen van groot nut bij het ontwerpen van nieuwe buizen, maar biedt ook de mogelijkheid om de invloed van kleine veranderingen in de geometrie van de buis te bestuderen. Er is goede hoop dat het op deze manier mogelijk zal zijn de noodzakelijke fabricagetoleranties nauwkeuriger vast te stellen.

Fluorescentieschermen

Het fluorescentiescherm van een beeldbuis bestaat uit een dunne korrellaag van een fosfor die de kinetische energie van de invallende elektronen omzet in licht. Deze fosforlaag is afgedekt met een uiterst dunne, doch ondoorzichtige laag aluminium. Deze verhoogt de nuttige lichtopbrengst, op dezelfde wijze als ook in een televisiebeeldbuis gebeurt, en verhindert bovendien de terugkoppeling door lichtuitstraling naar de fotokatode.

Het scherm moet uiteraard voldoen aan enkele voor de hand liggende eisen betreffende kleur, rendement en nalichttijd; bovendien moet het in staat zijn om beelden weer te geven met een zo groot mogelijk scheidend vermogen. Een eerste vereiste voor een scherm met een groot scheidend vermogen is dat de fosforkorrels klein zijn. Bovendien moeten deze korrels gedurende het gehele fabricageproces van het scherm los van elkaar blijven, anders gaan de voordelen van de aanvankelijk geringe deeltjesgrootte weer verloren. Dit laatste is vaak moeilijk in overeenstemming te brengen met de eis van een goede hechting aan de ondergrond waarop de fosfor wordt aangebracht.

Voor de fabricage van schermen met een groot scheidend vermogen worden in verschillende laboratoria zeer verschillende technieken gebruikt, maar het aanbrengen van de fosfor gebeurt in het algemeen door deze te laten bezinken uit een suspensie, die tevens een stof bevat om de deeltjes op de ondergrond vast te zetten. In ons laboratorium is een techniek ontwikkeld die is gebaseerd op de methode waarmee kleurentele-

[13] P. Schagen, H. Bruining en J. C. Francken, A simple electrostatic electron-optical system with only one voltage, Philips Res. Repts. **7**, 119-130, 1952.

[14] C. Weber, Het berekenen van potentiaalvelden en elektronenbanen met behulp van een elektronische rekenmachine, Philips techn. T. **24**, 130-143, 1962; C. Weber, Analogue and digital methods for investigating electron optical systems, dissertatie Eindhoven, 1967.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

visieschermen worden vervaardigd; er zijn enkele wijzigingen aangebracht om het grote scheidend vermogen te kunnen bereiken dat voor de beeldbuizen vereist is [15]. De fosfor is gesuspendeerd in een oplossing van polyvinylalcohol en wordt uit deze suspensie op het scherm afgezet. De aldus verkregen laag wordt gehard door hem via het glas waarop het scherm is aangebracht te bestralen met een kwiklamp; daarna wordt de niet-geharde fosfor weggespoeld. Op deze wijze wordt de dikte van het fluorescentiescherm bepaald door de belichtingstijd. De polyvinylalcohol-suspensie kan zeer stabiel gemaakt worden, waardoor de fijnheid van de korrels behouden blijft. Deze techniek kan zowel voor gebogen als voor vlakke schermen met succes worden toegepast. *Fig. 15* toont de gemeten modulatie-overbrengingsfunctie van een scherm dat volgens deze techniek werd vervaardigd en waarvan de deeltjesgrootte ligt tussen 0 en 5 μm. Het grootste scheidend vermogen, gemeten aan een patroon van zwarte en witte strepen, bedroeg hierbij 130 lijnenparen per mm.

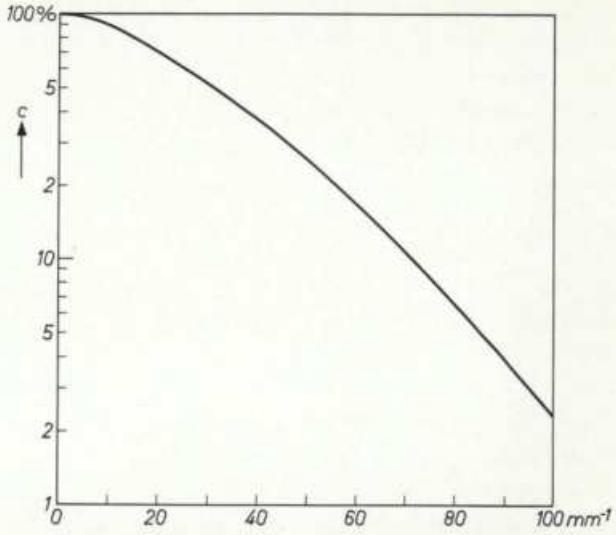


Fig. 15. Modulatie-overbrengingsfunctie van een fluorescentiescherm, vervaardigd volgens de „polyvinylalcoholmethode", waarbij is uitgegaan van deeltjes met afmetingen tussen 0 en 5 μm. Het beeldcontrast c is uitgezet tegen de ruimtelijke frequentie uitgedrukt in mm^{-1}.

Slotbeschouwing

Het onderzoekprogramma voor beeldbuizen in het Mullard-researchlaboratorium, dat in dit artikel is besproken, is geleidelijk uitgegroeid tot zijn huidige omvang. Het ziet er momenteel niet naar uit dat in de nabije toekomst de belangstelling voor beeldtransformatie en beeldversterking zal verflauwen. Integendeel, de nieuwste ontwikkelingen op het gebied van de röntgenbeeldversterking, de passieve donkerkijkers en de thermische beeldtransformatietechnieken schijnen er alle op te wijzen dat een nog verdere uitbreiding op dit gebied te verwachten is.

Wij hopen dat dit laboratorium ook verdere bijdragen zal kunnen leveren tot de ontwikkeling op dit fascinerende gebied.

[15] H. D. Stone, Preparation of high resolution phosphor screens, Adv. in Electronics and Electron Phys. **22A**, 565-570, 1966.

Samenvatting. Het eerste deel van dit artikel geeft een beschrijving van een gedeelte van het onderzoek aan beeldtransformatorbuizen dat in het verleden in het Mullard-researchlaboratorium is verricht; de nadruk lag hierbij op het gebruik van deze buizen als fotografische sluiter. Daarna volgt een bespreking van de verschillende buisparameters die voor beeldversterking van belang zijn. De ontwikkelde gezichtspunten zijn van grote betekenis geweest voor het onderzoekprogramma en hebben o.a. geleid tot de ontwikkeling van „donkerkijkers" en van een tweetrapsbuis voor het detecteren van Cerenkov-straling. Voor de donkerkijkers is vooral van groot belang geweest de ontwikkeling van buizen met regelbare vergroting en van buizen die met een vezeloptiek aan elkaar worden gekoppeld om een grote lumenversterking te bereiken. Het laatste deel van het artikel behandelt enige bijkomende onderzoekingen die in het laboratorium worden verricht, en de betekenis ervan voor beeldtransformator- en beeldversterkerbuizen. Hierbij wordt ingegaan op het werk aan optische systemen, fotokatodes, elektronenoptiek en fluorescentieschermen.

Chemische depositie met een elektronenbundel

H. N. G. King

Thermische bewerking

Het onderzoek aan de elektronenbundel als werktuig is in het Mullard-laboratorium begonnen in 1961. De belangstelling was toen gericht op mechanische bewerkingen, waarbij de energie van de bundel gebruikt wordt om de temperatuur van het werkstuk plaatselijk zodanig te verhogen dat er verdamping optreedt. Door de bundel op geschikte wijze in twee onderling loodrechte vlakken af te buigen en, indien nodig, het werkstuk mechanisch te bewegen, kunnen in alle mogelijke materialen gemakkelijk gaten van allerlei vorm worden geboord. Gewoonlijk wordt een pulserende bundelstroom toegepast; de impulsduur wordt dan zo gekozen dat de verhitte plek niet te zeer wordt vergroot door warmtegeleiding. De herhalingsfrequentie van de impulsen wordt in het algemeen beperkt door de maximaal toelaatbare temperatuurstijging van het werkstuk als geheel.

H. N. G. King, B.Sc. Phys., medewerker van Mullard Research Laboratories, Redhill (Surrey), Engeland.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Om deze techniek te onderzoeken, hebben we een toestel ontworpen met de volgende gegevens:

spanning:	10-140 kV;
impulsstroom:	0-20 mA;
gemiddeld vermogen:	tot 150 W;
impulsduur:	1 μs en onbeperkt langer.

Het toestel werd uitgevoerd met een eenvoudig elektronenkanon met een haarspeldkatode van wolfraam; de bundelstroom werd bestuurd door de spanning van de wehneltelektrode. Met behulp van één magnetische lens werd de bundel gefocusseerd, en op deze wijze kon onder normale voorwaarden een focus van 5 μm worden verkregen bij een bundelstroom van 1 mA en een spanning van 100 kV.

Het toestel werd zodanig geconstrueerd dat het bij een geringere intensiteit van de bundelstroom tevens kon worden gebruikt als eenvoudige elektronen-aftastmicroscoop met klein scheidend vermogen. Deze faciliteit is zeer nuttig gebleken voor het stellen van het werkstuk en voor het inspecteren van de gemaakte gaten.

Het toestel heeft zijn bruikbaarheid voor vele en uiteenlopende toepassingen bewezen; er is een aanzienlijke hoeveelheid experimenteel werk mee verricht, zowel om de werking van het toestel zelf te verbeteren als om de geschiktheid van de techniek voor diverse toepassingen na te gaan. Het uitvoerigst onderzocht is het boren van diamanten voor trekstenen [1].

Micro-elektronische toepassingen

Enige tijd geleden zijn we geïnteresseerd geraakt in micro-elektronische toepassingen van de werking van elektronenbundels. Voor deze toepassingen is het warmte-effect van de bundel wellicht minder belangrijk dan het vermogen van energierijke elektronen om chemische veranderingen tot stand te brengen. Zo kan men een fotografische emulsie of een fotolak belichten met een elektronenbundel in plaats van met licht. Het is daarbij mogelijk een bijzonder groot scheidend vermogen te verkrijgen: er is een veel kleinere bundelstroom vereist dan voor warmtebewerking, met als gevolg een veel kleiner focus. Er is in dit geval natuurlijk ook geen beperking ten gevolge van de golflengte, zoals bij licht, en de snelheid en het gemak waarmee een elektronenbundel kan worden afgebogen, maken het proces zeer geschikt voor automatisering.

Er zijn vele andere chemische reacties die door bestraling met elektronen geactiveerd kunnen worden. We hebben onderzocht of de werking van de bundel toegepast zou kunnen worden voor het afzetten van stoffen op een bepaalde onderlaag [2]. Aanvankelijk was het werk gericht op het maken van diffusiemaskers van siliciumdioxide op silicium. We zijn van de verwachting uitgegaan dat het grote scheidend vermogen dat met deze methode te bereiken is, ons in staat zou stellen om transistors te maken voor hogere frequenties dan tot dusver, en dat het elimineren van het etsproces bij de fotolaktechniek bevorderlijk zou zijn voor het verkrijgen van een reproduceerbaar, groot scheidend vermogen.

Het procédé is als volgt. In de werkruimte van de elektronenbundelmachine wordt in de buurt van het werkstuk wat damp van tetraëthoxysilaan gebracht. Er zullen dan voortdurend dampmoleculen condenseren òp en opnieuw verdampen vàn de aanwezige oppervlakken, maar in elk geval zullen de moleculen er ook een zekere tijd verblijven. Krijgen ze in die tijd energie van een opvallend elektron, dan kan dit tot gevolg hebben dat de moleculen weer verdampen, dissociëren of brugbindingen aangaan met andere moleculen. In de beide laatste gevallen kan zich een niet-vluchtig produkt vormen (siliciumdioxide of een polymeer), en er zal zich een laagje afzetten overal waar elektronen een oppervlak treffen.

De eerste experimenten met het beschreven toestel toonden aan dat de depositie met voldoend grote snelheid plaatsvond en dat een scheidend vermogen van minder dan 1 μm mogelijk was. Het onderzoek werd voortgezet met een bestudering van het afzettingsproces en van de fysische en chemische aard van de verkregen laagjes. Hiertoe werd een opstelling gemaakt waarmee dunne lagen van grote oppervlakte op deze wijze kunnen worden aangebracht. We vonden hiermee dat, hoewel het gehalte aan koolstof in de aangebrachte laag tot 20% kan bedragen, de laag toch voldoende afschermt tegen diffusie van borium, fosfor en arseen in silicium.

Om te laten zien wat deze techniek vermag, maken we nu MOS-transistors waarbij het diffusiemasker dat de toevoer- en de afvoerelektrode scheidt, wordt afgezet door de elektronenbundel. Daarbij wordt gestreefd naar een afstand van ongeveer 1 μm tussen toevoer- en afvoerelektrode. *Fig. 1a* en *b* toont een goed werkende transistor die op deze wijze gemaakt is. De maskerende laag is 200 nm dik en wordt in 1 minuut afgezet.

Voor deze techniek is een elektronenbundelmachine met groot scheidend vermogen gemaakt (*fig. 2*), die voorzien is van een afzonderlijk pompsysteem voor microscoopbuis en kanon, zodat daarin een goed

---

[1] I. H. Lewin, Het boren van diamanten met een elektronenbundel, blz. 275 van dit nummer.

[2] R. Ford, H. N. G. King, E. D. Roberts en J. M. S. Schofield, The preparation of high resolution silica diffusion barriers by an electron beam simulated reaction, wordt gepubliceerd in Suppl. Vol. Proc. Joint IERE-IEE Conf. on applications of thin films to electronic engineering, Londen 1966.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

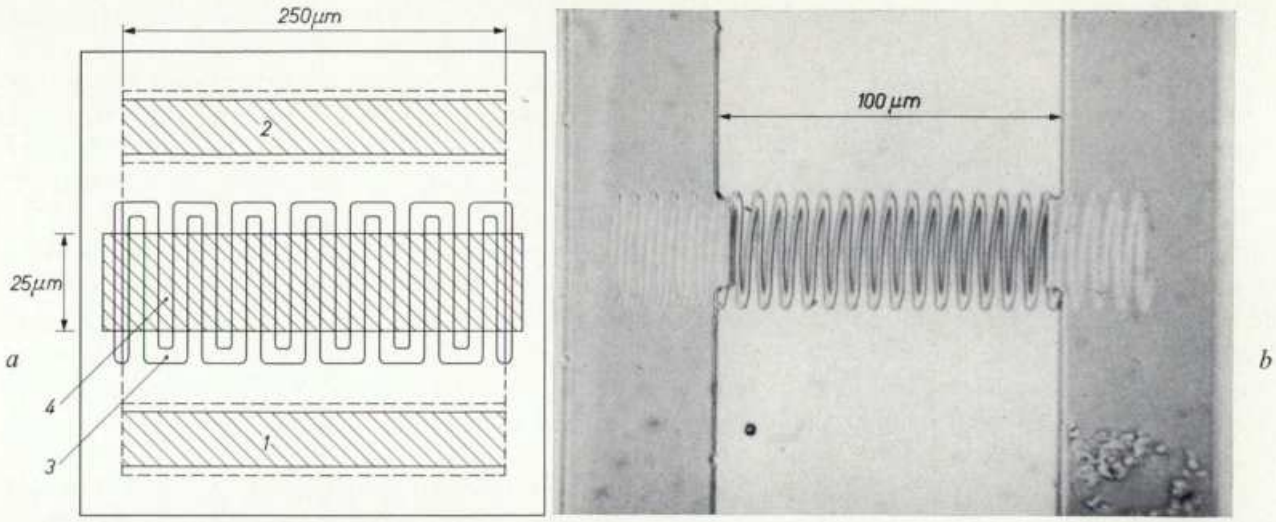


Fig. 1. *a*) Schema van de MOS-transistor. *1* toevoercontact. *2* afvoercontact. *3* kanaal. *4* stuurelektrode.
b) Het diffusiemasker voor de transistor, afgezet met behulp van een elektronenbundel.

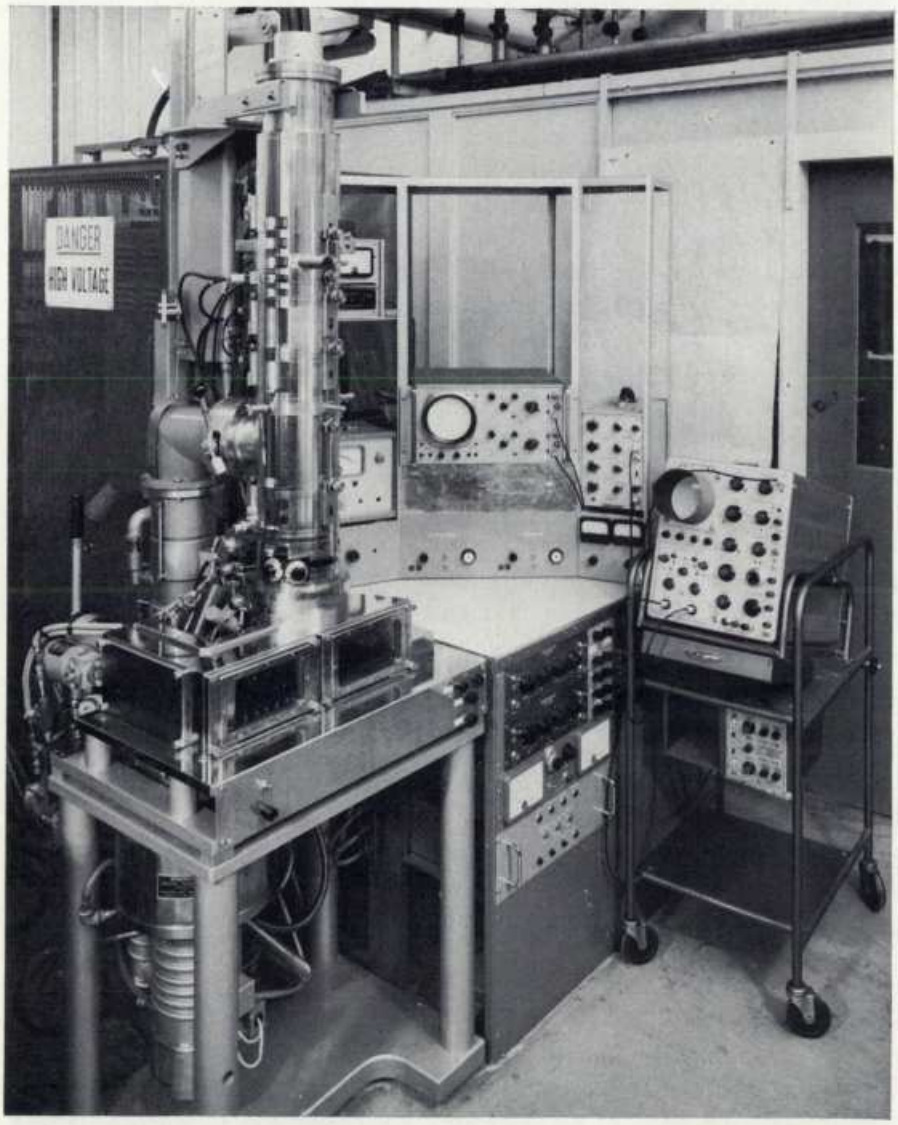


Fig. 2. De elektronenbundelmachine met groot scheidend vermogen die in het Mullard researchlaboratorium is geconstrueerd voor het onderzoek van micro-elektronische toepassingen.

vacuüm kan worden onderhouden terwijl er damp aan het werkstuk wordt toegevoerd. Het toestel kan met vier magnetische lenzen werken. *Fig. 3* illustreert twee mogelijke werkwijzen: bij de ene wordt door geschikte afbuiging van de bundel het vereiste patroon vervaardigd, bij de andere vormen de onderste twee lenzen een verkleind beeld van een masker dat halverwege de microscoopbuis is aangebracht. De bovenste twee lenzen vormen dan een condensorsysteem voor de belichting van het masker. Het toestel kan ook worden gebruikt als elektronen-aftastmicroscoop. Door deze faciliteit kan men ervoor zorgen dat de aangebrachte laag precies op een voorgeschreven plaats op het werkstuk terechtkomt.

Hoewel het grootste deel van ons werk het afzetten van maskerende lagen betrof, menen we dat dit slechts één uit vele soortgelijke processen is die voor de praktijk van belang zouden kunnen zijn. Zo zijn

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

we thans bezig het deponeren van metaallaagjes te onderzoeken, en we zijn erin geslaagd goed geleidende dunne laagjes te maken door een oppervlak te bombarderen met elektronen terwijl er tindichloride wordt opgedampt.

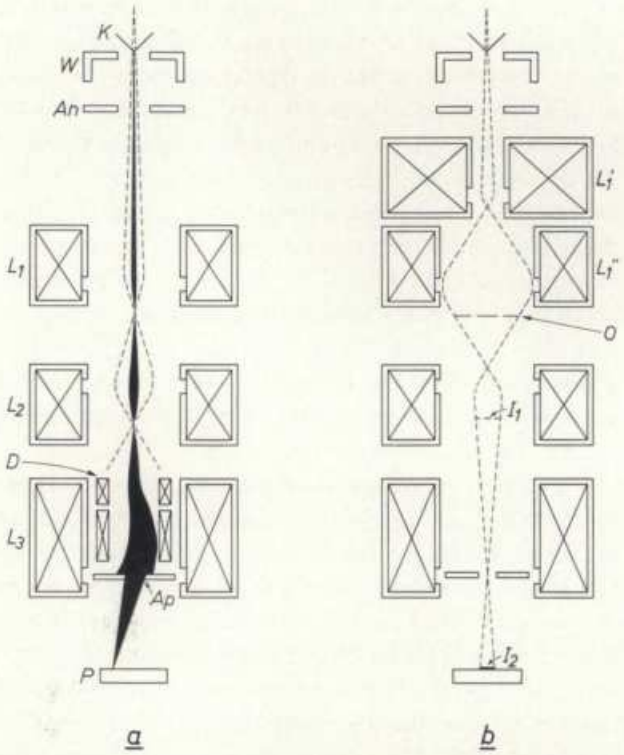


Fig. 3. Schema van de elektronenbundelmachine. Er zijn twee werkwijzen mogelijk. In (*a*) wordt het vereiste patroon vervaardigd door de gefocusseerde bundel te deflecteren, in (*b*) vormen de twee onderste lenzen een verkleind beeld van een masker dat halverwege de microscoopbuis is aangebracht. *K* katode. *W* wehneltelektrode. *An* anode. L_1', L_1'' condensorlenzen. L_2 tussenlens. L_3 objectieflens. *O* masker. I_1 eerste beeld. I_2 eindbeeld. *D* deflectiesysteem. *Ap* opening. *P* werkstuk.

Automatisering

Om de mogelijkheden tot automatisering van elektronenbundels te onderzoeken, is nog een toestel in aanbouw, waarin stand en intensiteit van de bundel zullen worden bestuurd door een kleine in de regelketen opgenomen („on-line") rekenmachine voor procesbesturing. Ten einde het gebied dat met een gegeven nauwkeurigheid kan worden afgetast, te vergroten, zal dit toestel in staat zijn de bundel in te stellen ten opzichte van merktekens op het werkstuk. Ook zal worden voorzien in een automatische focusseringscorrectie. Overwogen wordt het toestel te gebruiken om fotolak te belichten, omdat dit een snel proces is, aangepast bij de bewegingssnelheid van de bundel. Het zal met dit toestel mogelijk zijn het maken van maskers, of het verrichten van directe bewerkingen aan schakelingen, te leiden met de besturingsband van de rekenmachine.

Samenvatting. Een elektronenbundel kan worden gebruikt als warmtebron of om een chemische reactie te veroorzaken. Men kan het elektronenbombardement laten plaatsvinden in een nauwkeurig gedefinieerd gebied op het oppervlak van het werkstuk, of men kan de bundel — door besturing van de afbuiging — nauwkeurig een bepaald patroon op het oppervlak laten beschrijven. Een onderzoek van deze mogelijkheden heeft geleid tot de constructie van apparaten daarvoor. Het effect van de bewerking met de elektronenbundel kan worden nagegaan door dezelfde apparatuur bij een kleinere intensiteit van de bundel als elektronen-aftastmicroscoop te gebruiken. Aanvankelijk zijn in het bijzonder de mogelijkheden van thermische bewerking onderzocht. Thans is in onderzoek een techniek waarmee met een groot scheidend vermogen diffusiemaskers kunnen worden afgezet op silicium voor het maken van planaire actieve schakelingselementen.

Het boren van diamanten met een elektronenbundel

I. H. Lewin

Voor het trekken van draden worden diamanten trekstenen gebruikt; door de grote hardheid van diamant hebben deze nl. een lange levensduur en is de draaddiameter nauwkeurig bepaald.

In het Philipsconcern bestaat een grote behoefte aan dergelijke trekstenen, voornamelijk voor de produktie van gloeidraden. Ze worden gemaakt in de trekstenenfabriek van dit concern te Valkenswaard; een deel ervan is bestemd voor export.

Voor het boren van diamant gebruikt men gewoonlijk een van de volgende drie methodes, die elk hun voordelen en beperkingen hebben.

1) Mechanisch boren, waarbij een tegelijkertijd draaiende en oscillerende naald wordt gebruikt in combinatie met een diamantpasta. Deze methode biedt vele mogelijkheden, maar is langzaam.

2) Elektrolytisch boren, waarbij een lage spanning wordt aangelegd tussen de diamant en een naald terwijl het geheel is ondergedompeld in een elektrolyt. Deze methode geeft een goede vorm van het gat, maar is beperkt tot gaten met een boring van minder dan 100 μm.

3) Vonkverspaning, waarbij een ontlading van een

I. H. Lewin, medewerker van Mullard Research Laboratories, Redhill (Surrey), Engeland.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

hoge spanning plaatsvindt tussen de diamant en een naald. Deze methode is tamelijk snel, maar geeft een ruw oppervlak.

In al deze gevallen is nog een polijstbewerking nodig om de juiste afmetingen te bereiken.

Met een elektronenbundel kunnen harde materialen worden bewerkt; ook deze techniek zou dus geschikt kunnen zijn voor het boren van diamant. De mogelijkheden van deze toepassing zijn onderzocht in samenwerking met Philips' trekstenenfabriek in Valkenswaard en Mullard Radio Valve Company te Blackburn.

Boren met een elektronenbundel

In *fig. 1* is de doorsnede gegeven van een gebruikelijk type diamanten treksteen. We zien dat de vorm van het gat is bepaald door drie elkaar snijdende kegelvlakken; dit is zeer gunstig, aangezien een gat dat door een elektronenbundel is geboord, van nature conisch is. De oorzaak hiervan is dat de gemiddelde energie per eenheid van oppervlakte op de schuine wanden van het ontstaande gat geringer is dan op de vlakke bodem ervan. De boorsnelheid wordt bepaald door de gemiddelde energiedichtheid aan het oppervlak; wanneer deze onder een bepaalde minimumwaarde komt, wordt geen materiaal meer verwijderd.

Voor het boorproces wordt een pulserende elektronenbundel van 70 kV gebruikt; de impulsduur, de herhalingsfrequentie en de bundelstroom worden voor iedere diamant optimaal ingesteld. Meestal wordt een bundelstroom van 3-6 mA gebruikt en een impulsduur van ongeveer 100 μs. De impulsfrequentie wordt zo gekozen dat de temperatuur van de diamant voldoende ver beneden de temperatuur blijft waarbij hij roodgloeiend wordt — afhankelijk van de grootte van de diamant is deze frequentie 30-500 Hz. Het focus, dat een diameter van 30-40 μm heeft, wordt langs elektromagnetische weg zodanig afgebogen dat een cirkelvormig aftastpatroon ontstaat, dat is ingesteld op het centrum waar maximale bewerking is vereist.

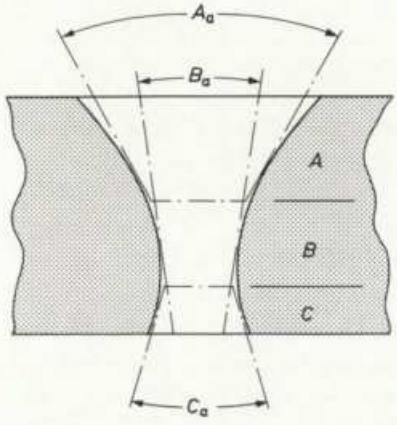


Fig. 1. Doorsnede van een diamanten treksteen. *A* ingang. *B* trekgat. *C* uitgang. A_α ingangsconus. B_α trekconus. C_α uitgangsconus.

Om alle eventuele effecten van het niet-cirkelvormig zijn van het focus uit te sluiten, is de diamant gemonteerd in een langzaam draaiende houder; voor het centreren van de diamant in de as van de bundel wordt de machine gebruikt als elektronen-aftastmicroscoop. Als eerste bewerking wordt de trekconus geboord, totdat dit gat aan de onderkant van de diamant doorbreekt. Het aftastpatroon wordt dan zo gewijzigd dat de energie op de wanden van het gat wordt geconcentreerd; de bewerking wordt hierna voortgezet tot de uitgangsdiameter van de trekconus de juiste waarde heeft bereikt. De „scherptediepte", d.i. de diepte van het gebied waarin de elektronenbundel zo nauw is dat bewerking kan plaatsvinden, is slechts 800 μm. Om een bevredigende boorsnelheid te handhaven, moet het focus van de bundel dus steeds worden bijgesteld, afhankelijk van de diepte van het gat.

Vervolgens wordt de ingangsconus geboord. Hiervoor wordt het aftastpatroon op de vereiste diameter ingesteld; voorts worden kortere impulsen gebruikt bij een hogere herhalingsfrequentie, dit om de ruwheid te verminderen die het oppervlak krijgt als gevolg van kratervorming. Nadat de diamant in zijn houder is omgedraaid en weer is gecentreerd op de uitgangsdoorsnede van de trekconus, wordt als laatste de uitgangsconus geboord.

Tijdens alle stadia wordt het boorproces visueel gecontroleerd; waar nodig, worden metingen uitgevoerd door de machine als elektronen-aftastmicroscoop te gebruiken.

In een later stadium wordt de diamant nog mechanisch nabewerkt om de eindafmetingen te verkrijgen.

De verkregen resultaten

In enkele honderden diamanten met een dikte van 1-3 mm zijn gaten geboord met een boring van 40 μm tot 2 mm. De *figuren 2* en *3* geven een beeld van de doorsnede van dergelijke geboorde diamanten. De gemiddelde boortijden voor complete trekstenen zijn als volgt:

nominale boring 100 μm	8 min	spreiding in elk van deze tijden 50%.
400 μm	11 min	
1 mm	21 min	
2 mm	27 min	

Deze tijden steken gunstig af bij de uren of dagen die nodig zijn bij de conventionele technieken. Bovendien konden ze nog meer worden verkort, vooral bij grote diamanten, door een regelsysteem te gebruiken dat de brandpuntsafstand moduleerde in faze met de uitwijking van de bundel, zodat deze altijd was gefocusseerd op het oppervlak, waar de schuine wand van het gat ook bestraald werd.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Fig. 2. Diamanten treksteen met een dikte van 900 μm; boortijd 5½ minuut, boring van het gat 68 μm voor mechanische nabewerking tot 100 μm.

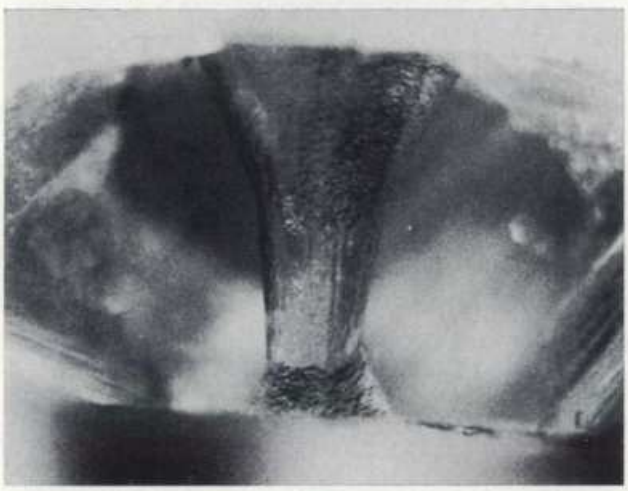


Fig. 3. Diamanten treksteen met een dikte van 1200 μm; boortijd 12 minuten, boring van het gat 270 μm voor mechanische nabewerking tot 400 μm.

Voor normale gaten is de minimale conushoek die nog zonder moeite kan worden verkregen 14-16°. Het kleinste treksteengat dat op het ogenblik kan worden geboord, heeft een boring van ongeveer 60 μm; wel zijn er blinde gaten geboord van 20 μm en gaten waarbij de opening die aan de onderkant van de diamant ontstaat als het gat daar doorbreekt, een diameter van 20 μm heeft. Het systeem dat de aftastende beweging van de elektronenbundel verzorgt, stelt op het ogenblik een bovengrens van 2,1 mm aan de boring van de trekstenen; er zijn echter geen technische moeilijkheden die een evtl. vereiste vergroting hiervan in de weg staan.

De afwerking van het oppervlak van het gat hangt samen met de grootte van de conushoek ter plaatse. In de trekconus is de ruwheid 6-10 μm; in de ingangs- en de uitgangsconus is dit 15-20 μm, waarbij de ruwheid in het algemeen groter wordt naarmate de diameter toeneemt. De ruwheid van de ingangsconus kan worden verkleind als langere boortijden zijn toegestaan.

Er zijn twee soorten scheuren waargenomen die aanleiding kunnen geven tot mislukken van het boren: grote scheuren, die hoofdzakelijk radiaal lopen en soms de diamant in tweeën splijten, en micro-scheurtjes van 5-10 μm, die gewoonlijk een regelmatig patroon vertonen. De grote scheuren worden veroorzaakt door een te grote boorsnelheid, slechte inklemming van de diamant of fouten in de structuur ervan. Microscheurtjes komen alleen voor bij kleine gaten (< 400 μm), gewoonlijk op of nabij een overgang naar een andere sectie. Wij hebben boormethodes ontwikkeld waarmee het optreden van scheuren tot minder dan 10% is gereduceerd; naarmate meer ervaring wordt opgedaan, zal dit percentage ongetwijfeld nog verder dalen.

Op het ogenblik zijn bij Mullard Radio Valve Company in Blackburn meer dan 50 diamanten trekstenen met een boring van 600-1500 μm in gebruik die met een elektronenbundel zijn vervaardigd. Tot heden zijn deze stenen wat betreft de slijtsnelheid en de hoeveelheid getrokken draad per treksteen vergelijkbaar met diamanten trekstenen die met de conventionele technieken zijn gemaakt.

Slotbeschouwing

De voornaamste voordelen van het boren met een elektronenbundel zijn de snelheid en de flexibiliteit van het boren, en de goede vorm van het gat. Tegenover deze voordelen staan de hoge investering en de ingewikkeldheid van het systeem. Uiteraard kan een deel van het boorproces worden geautomatiseerd, maar waarschijnlijk zal toch een zeker toezicht tijdens het proces wenselijk blijven. Reeds nu er nog slechts betrekkelijk weinig ontwikkelingswerk aan is besteed, zijn de kosten per geboord gat (rekening houdend met de besparing van diamantslijpsel) vergelijkbaar met de kosten bij de bestaande technieken, zodat er alle reden is om aan te nemen dat het diamantboren met de elektronenbundel een economisch levensvatbaar produktieproces zal worden.

Samenvatting. De mogelijkheid om met een elektronenbundel harde materialen te bewerken, heeft geleid tot een onderzoek naar de bruikbaarheid van deze methode voor het vervaardigen van diamanten trekstenen. Hierbij is een experimentele machine gebruikt voor het boren met een 70-kV-elektronenbundel (grootte van het focus 30-40 μm). Er zijn uit diamanten met een dikte van 1-3 mm enkele honderden trekstenen gemaakt met een boring van 40 μm tot 2 mm. Minstens 50 hiervan worden op het ogenblik gebruikt voor het trekken van draden; ze geven resultaten die vergelijkbaar zijn met trekstenen die op conventionele wijze zijn geboord. Het boren met een elektronenbundel geeft in vergelijking met de bestaande technieken een aanzienlijke verkorting van de boortijden; bij voortgezet onderzoek zal het waarschijnlijk ook in andere opzichten concurrerend kunnen zijn.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Ultrasone radar

Foto Walter Nürnberg

Bij slecht zicht is de navigatie van voertuigen op een vliegveld veel moeilijker dan in het normale verkeer. In omstandigheden waarbij men op de weg nog met 70 km/h kan rijden, kan op het vliegveld eventueel al elke verplaatsing onmogelijk geworden zijn. Voor het blind landen van vliegtuigen is dit een zeer ongewenste toestand: gebeurt er bij het landen een ongeval, dan zijn de reddingsdiensten (brandweer, ambulance enz.) niet in staat het verongelukte vliegtuig te bereiken. Lukt het hun toch, dan is er alle kans dat overlevenden worden overreden.

Ter oplossing van dit probleem moeten de genoemde voertuigen over een korte-afstandsradarinstallatie beschikken. Het scheidend vermogen wat betreft afstand moet hierbij enkele meters bedragen, wat met conventionele technieken niet te realiseren is. Een dergelijk scheidend vermogen zal echter gemakkelijk kunnen worden verkregen met ultrasone radar. Om de bruikbaarheid hiervan voor de genoemde toepassing te toetsen, is in ons laboratorium een experimentele installatie gebouwd, die op de foto is weergegeven. Het gebied dat men wil bestrijken, wordt afgetast met een roterende reflector. Deze straalt ultrageluid van 40 kHz uit dat door een transducent is opgewekt. Het afgetaste gebied wordt op een radarscherm afgebeeld. Een nadeel van ultrasone radar is dat de geluidsgolven door de lucht worden verzwakt, waardoor de dracht tot minder dan 100 m wordt beperkt. Ook is nadelig dat de geluidssnelheid betrekkelijk klein is: men kan daardoor het weer te geven gebied niet snel genoeg aftasten in verhouding tot de snelheid van de bewegende objecten die men wil kunnen detecteren.

Er wordt nu in het Mullard-laboratorium gewerkt aan verbeteringen van dit systeem waardoor zeer scherpe beelden kunnen worden verkregen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Een elektronisch gestuurd transmissiesysteem voor automobielen

R. W. Lindop

Bij automatische transmissiesystemen maakt men gewoonlijk gebruik van een planetaire versnellingsbak, waarbij de verschillende transmissieverhoudingen verkregen worden met behulp van afzonderlijke wrijvingskoppelingen of bandremmen. Overschakeling op een andere versnelling kan men hierbij verkrijgen zonder de aandrijving van de auto te onderbreken, en wel door telkens de volgende bandrem of wrijvingskoppeling in te schakelen voordat de vorige is uitgeschakeld. Verder wordt voor het overbrengen van het vermogen van de motor naar de versnellingsbak dikwijls een koppelomvormer gebruikt. De koppel-snelheidskarakteristiek hiervan maakt het mogelijk om de auto uit stilstand soepel in beweging te brengen. Wanneer een overmaat aan vermogen beschikbaar is, wordt aan systemen met koppelomvormers vaak de voorkeur gegeven. Hierbij wordt namelijk de acceleratie van het voertuig tijdens het overschakelen op een andere versnelling niet onderbroken, wat soepel rijden bevordert.

In dit artikel wordt een methode beschreven om met een normale versnellingsbak voor handbediening en een normale frictie een elektronisch gestuurd automatisch transmissiesysteem op te bouwen. De versnellingsbak en de frictie van de experimentele auto waarin de methode is toegepast, worden bediend door hydraulische mechanismen. Deze worden gestuurd door signalen van een regelschakeling, die op zijn beurt uit een aantal transducenten informatie ontvangt omtrent de snelheid van de auto, het toerental van de motor, de stand van de smoorklep, de ingeschakelde versnelling en de stand van de frictie

Bij de meeste systemen voor automatische transmissie wordt voor de keuze van de versnelling gebruik gemaakt van twee parameters, de snelheid van de auto en de stand van de smoorklep. Door toepassing van elektronische schakelingen is het mogelijk om op eenvoudige wijze deze parameters meer effectief te gebruiken. Zo past men b.v. bij alle conventionele systemen een mechanisch werkende regelaar toe, waarmee alleen *ogenblikswaarden* van de snelheid verwerkt kunnen worden. Elektronische systemen kunnen echter signalen leveren die bepaald worden door de versnelling, en verder kunnen tijdsvertragingen volgens eenvoudige functies in de signalen worden geïntroduceerd, waardoor een betere besturing van het transmissiemechanisme kan worden verkregen.

Een planetaire versnellingsbak met een koppelomvormer werkt soepeler dan het hierna te beschrijven systeem; een belangrijk nadeel van het eerstgenoemde systeem is echter dat de goede eigenschappen voor een deel verloren gaan door slijtage van de bandremmen. Bij een elektronisch gestuurd systeem is het mogelijk om het bedieningsmechanisme van de frictie op te nemen in een terugkoppellus. Hierdoor worden veranderingen in de eigenschappen gecompenseerd, zodat gedurende de gehele levensduur van de frictie de werking ervan niet verandert.

Een goede bestuurder kan met een auto die is uitgerust met een conventionele versnellingsbak en een frictie, soepel en vlug uit stilstand optrekken en betrekkelijk snel, doch zonder schokken, overschakelen. De „elektronische bestuurder" die hier zal worden beschreven en die is geïnstalleerd in een experimentele auto, neemt de bediening van de versnellingshendel en het frictiepedaal volledig over. Verder wordt tijdens het overschakelen ook de smoorklep bediend. Om een goede bestuurder te kunnen evenaren, moet de elektronische schakeling diens manier van rijden zo goed mogelijk nabootsen, waarbij bijzondere aandacht besteed moet worden aan de bediening van de frictie.

In de experimentele auto beschikt de bestuurder over een op de stuurkolom gemonteerde schakelaar, die in de volgende vier standen kan worden geplaatst:

1) achteruit,
2) neutraal,
3) rijden,
4) tweede versnelling.

Neutraal is de stand voor starten en stoppen van de motor, parkeren, enz. Voor normaal rijden wordt de schakelaar in de stand *rijden* gezet; hierbij werkt het transmissiesysteem geheel automatisch. In de stand *achteruit* is ditzelfde het geval voor het achteruitrijden. In de vierde stand blijft de tweede versnelling ingeschakeld, onafhankelijk van de snelheid van de auto en de stand van de smoorklep. Deze stand dient om het mogelijk te maken de motor als rem te gebruiken.

Het bedienen van de frictie en de versnellingsbak zijn mechanische handelingen, en er is dus een bestuurbare mechanische energiebron nodig. Hiervoor werd een hydraulisch systeem gekozen, en wel omdat dit met eenvoudige kleppen gemakkelijk te regelen is. Het hydraulische mechanisme wordt gevoed door een zui-

R. W. Lindop, medewerker van Mullard Research Laboratories, Redhill (Surrey), Engeland.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

gerpomp, die door de motor wordt gedreven.

Het overschakelen van de versnellingsbak gebeurt met behulp van twee plunjers, één voor de beweging van de versnellingshefboom in de langsrichting en één voor de beweging in de dwarsrichting. De olie wordt aan deze plunjers toegevoerd via een hoofdklep, die de druk wegneemt wanneer niet wordt overgeschakeld. Hierdoor kan het inwendige arrêteermechanisme de tandwielen in de juiste stand plaatsen.

Het kiezen van de versnellingen

In *fig. 1* is voor de drie versnellingen de trekkracht T uitgezet als functie van de snelheid v. Bij een gegeven stand van de smoorklep is het verschil tussen de trekkracht en de rijweerstand D beschikbaar voor de acceleratie. De topsnelheid is bereikt wanneer de weerstand (die natuurlijk afhangt van het wegoppervlak, de helling, enz.) gelijk is geworden aan de beschikbare trekkracht. Om zo snel mogelijk deze maximale snelheid te kunnen bereiken, moet worden overgeschakeld op de snijpunten van de trekkrachtkrommen (v_1 en v_2). Bij sommige motoren vallen deze snijpunten boven het maximaal toelaatbare toerental van de motor; in dit geval moet bij dit toerental worden overgeschakeld.

Een stel krommen zoals in fig. 1 is voorgesteld, kan worden getekend voor alle standen van de smoorklep. Wordt deze klep verder gesloten, dan snijden de krommen elkaar bij steeds lagere snelheden. Om met gebruikmaking van de versnellingen vlug te kunnen accelereren en ook de grootste snelheid te kunnen bereiken op hellingen (waar de weerstandslijn D hoger komt te liggen dan in fig. 1), moet bij een gegeven stand van de smoorklep zowel naar hogere als naar lagere versnellingen worden overgeschakeld bij de snijpunten van de trekkrachtkrommen. Bij een normale versnellingsbak daalt echter gewoonlijk de snelheid tijdens het overschakelen. Als nu de condities voor het opschakelen dezelfde zijn als die voor het terugschakelen, zal een voortdurend op- en terugschakelen optreden. Om deze reden moet bij een vaste stand van de smoorklep het opschakelen bij een grotere snelheid gebeuren dan het terugschakelen.

In de experimentele auto, die is voorzien van een versnellingsbak met drie versnellingen, worden voor het kiezen van de gewenste versnelling twee parameters gebruikt, de rijsnelheid en de stand van de smoorklep. Het signaal dat correspondeert met de snelheid, wordt verkregen met behulp van een tandwiel dat in een magnetisch veld draait. In een spoel die zich in het magnetische circuit bevindt, ontstaan dan spanningsimpulsen. Deze worden geïntegreerd en leveren een spanning die evenredig is met de snelheid. De stand van de smoorklep wordt afgeleid van een variabele weerstand, gekoppeld met het bedieningsmechanisme van deze klep.

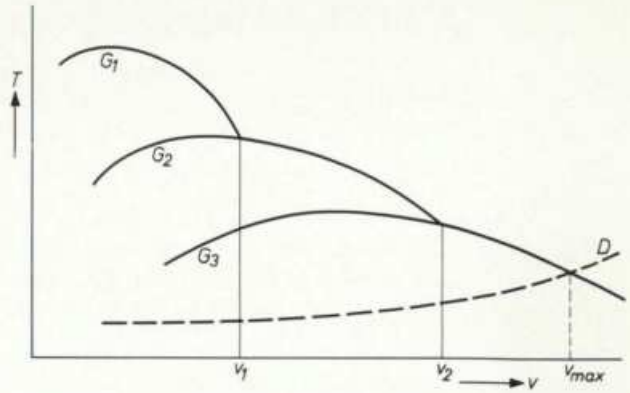


Fig. 1. Trekkracht T als functie van de snelheid v. De krommen G_1, G_2 en G_3 gelden resp. voor de eerste, de tweede en de derde versnelling. Om maximale acceleratie te verkrijgen, moet worden overgeschakeld bij v_1 en v_2. D is de rijweerstand.

De signalen die de snelheid en de klepstand aangeven, worden dan als volgt gebruikt. Het snelheidssignaal wordt gevarieerd als functie van de stand van de smoorklep; bij een bijna gesloten klep stijgt de spanning sterk met de snelheid, maar de verhouding tussen spanning en snelheid wordt kleiner als de smoorklep meer geopend is. De versnellingskiezer, waaraan deze spanning wordt toegevoerd, heeft vier kritische spanningsniveaus, $V_1 \ldots V_4$ (*fig. 2*). Beneden V_1 is altijd de laagste versnelling ingeschakeld; er wordt overgeschakeld naar de tweede versnelling wanneer de ingangsspanning de waarde V_2 overschrijdt. Er wordt echter pas teruggeschakeld als de spanning daalt tot V_1. Hierdoor is voorkomen dat het systeem heen en weer gaat schakelen tussen de eerste en tweede versnelling. In het gebied tussen V_2 en V_3 is steeds de tweede versnelling ingeschakeld; naar de derde versnelling wordt overgeschakeld als de ingangsspanning boven V_4 stijgt; om hier terugschakelen te doen plaatsvinden moet de ingangsspanning tot beneden V_3 dalen.

Een bestuurder die in de kortst mogelijke tijd een

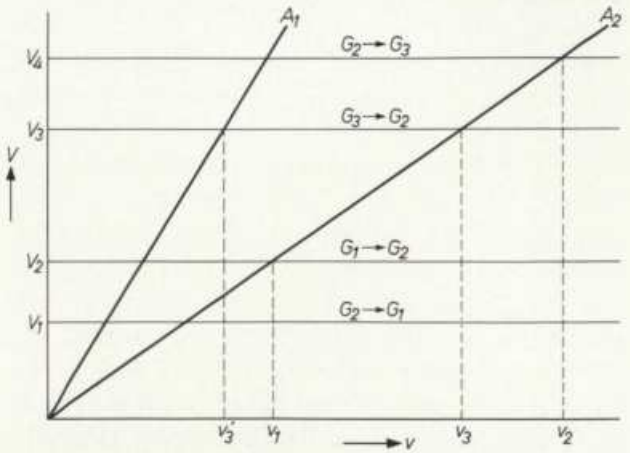


Fig. 2. Het verloop van de stuurspanning als functie van de snelheid. De lijn A_1 geldt voor juist even geopende smoorklep, de lijn A_2 voor volledig geopende smoorklep. V_1, V_2, V_3 en V_4 zijn de niveaus waarbij wordt overgeschakeld.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

grote snelheid wil bereiken, zal het gaspedaal zo ver mogelijk indrukken; de auto volgt dan de in fig. 2 getekende lijn A_2, die geldt voor geheel geopende smoorklep. Overschakelen naar de tweede en naar de derde versnelling gebeurt dan bij resp. de snelheden v_1 en v_2.

Bij minder ver geopende smoorklep worden v_1 en v_2 kleiner doordat zij corresponderen met de snijpunten van de dan geldende trekkrachtkrommen.

Wanneer op de normale manier wordt gereden in een snelheidsgebied waarbij moet worden overgeschakeld, is de snelheid zelden constant; de bestuurder laat, met gebruikmaking van de versnellingsbak, de snelheid toe- of afnemen. Tijdens het accelereren houden de meeste bestuurders het gaspedaal in een vaste stand; zij drukken het alleen verder in als zij voelen dat de acceleratie te gering wordt. Bij hun manier van rijden hebben hierdoor langzaam optredende veranderingen in de eigenschappen van de motor weinig invloed op de soepelheid. Bij een automatische versnellingsbak is echter te vroeg overschakelen zeer onaangenaam, en wel doordat de betrekkelijk grote acceleratie wordt onderbroken. Wordt er te láát overgeschakeld, dan is dit minder onaangenaam, maar de bestuurder kan dan in ieder geval de overschakeling vervroegen door de smoorklep gedeeltelijk te sluiten. Hieruit volgt dat, als bij een perfect werkende motor de *ogenblikswaarden* van snelheid en smoorklepstand voor het kiezen van de versnellingen gebruikt worden, de omschakelpunten hoog (dat is laat) moeten liggen. Wanneer echter de motor koud (of oud) is, kan deze zo slecht werken dat een andere instelling gewenst is. Deze moeilijkheid kan worden omzeild door de snelheden waarbij wordt overgeschakeld, in te stellen voor een slecht werkende motor (waardoor deze dus bij een goed ingestelde motor te vroeg komen) en het snelheidssignaal te verminderen met een bedrag dat van de acceleratie afhangt. De „schijnbare" snelheid wordt dan gereduceerd totdat de acceleratie van de auto afneemt; hierna neemt de signaalspanning snel toe, waardoor het overschakelen op een gunstiger punt geschiedt. Een dergelijk effect kan men op eenvoudige wijze bereiken door de schakeling die het snelheidssignaal produceert, een grote tijdconstante te geven, waardoor tijdens het accelereren het signaal achter is bij de werkelijke snelheid.

Er moet ook op de motor kunnen worden geremd; anders zouden immers in het verkeer moeilijkheden kunnen ontstaan. Als b.v. een bestuurder, rijdend in de tweede versnelling, vindt dat hij te snel inloopt op de wagen voor hem, en hij de smoorklep meer sluit, kan het gebeuren dat overgeschakeld wordt naar de derde versnelling. Als in dit geval de bestuurder zijn voet van het gaspedaal licht om zijn snelheid te verminderen, kan door de overmaat van vermogen in de motor, de snelheid zelfs toenemen. Hierdoor is het zeer moeilijk om met de smoorklep de snelheid nauwkeurig in de hand te houden als men langzamer dan ongeveer 50 km/h rijdt; in dicht verkeer is de mogelijkheid hiertoe echter juist zeer gewenst.

Deze moeilijkheid is geëlimineerd doordat het overschakelen wordt verhinderd als men de smoorklep zo ver sluit dat de snelheid afneemt (dit is juist boven de stand voor stationair draaien). Hierbij wordt niets gewijzigd aan de in fig. 2 geschetste situatie, noch aan de mogelijkheid om door kleine bewegingen van het gaspedaal naar hogere versnellingen over te schakelen.

We hebben hierboven gezien dat het gewenst is om het snelheidssignaal kunstmatig te vertragen. Als deze vertraging wordt ingevoerd nadat de informatie omtrent de stand van de smoorklep is geïntroduceerd, wordt ook het overschakelen naar hogere versnellingen vertraagd; men kan dan dus nog voordat wordt overgeschakeld de smoorklep weer terugbrengen in de vroegere stand.

Uit fig. 2 blijkt verder nog dat bij snelheden boven v_3' de derde versnelling altijd ingeschakeld kan zijn en dat tussen v_3' en v_3 bij plotseling openen van de smoorklep terugschakeling naar de tweede versnelling kan optreden. Dit „kick-down-effect" is nuttig bij inhaalmanoeuvres, maar om te voorkomen dat het hinderlijk lang duurt voor men de gewenste acceleratie verkrijgt, moet het terugschakelen zeer snel gebeuren. De kunstmatige vertraging van de signaalspanning moet dus alleen optreden als deze spanning toeneemt. Hoewel nu de bestuurder kan voorzien een grotere acceleratie en dus een lagere versnelling nodig te zullen hebben, schakelt helaas de automatische transmissie pas terug op het moment dat deze acceleratie nodig is. Als de bestuurder het gaspedaal intrapt en onmiddellijk daarna weer laat opkomen, zou (met een kleine vertraging) de hogere versnelling weer kunnen worden ingeschakeld, tenzij hij, zoals in de praktijk vaak gebeurt, het pedaal voldoende ver laat opkomen om de lagere versnelling ingeschakeld te houden.

Het verschil in de signaalniveaus waarbij op- en terugschakelen optreedt, welk verschil immers nodig is om ongewenst heen en weer schakelen te voorkomen, verkleint het gebied waarin bij het intrappen van het gaspedaal het „kick-down-effect" optreedt. In de praktijk is gebleken dat dit niveauverschil vrij groot moet zijn, en wel om op niet te steile hellingen te kunnen opschakelen; hierdoor wordt het „kick-down-gebied" ontoelaatbaar klein. Om hierin verbetering te brengen wordt bij snel intrappen van het gaspedaal de ingangsspanning van de versnellingskiezer kortstondig verlaagd tot beneden het niveau dat bij de desbetreffende stand van de smoorklep en de snelheid behoort (fig. 2). Zodoende kan de bestuurder de keuze van de versnelling ook beïnvloeden door het gaspedaal snel of

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

langzaam te bewegen.

Om alle hierboven vermelde handelingen te kunnen uitvoeren, moeten aan de elektronische apparatuur verschillende gegevens worden toegevoerd. In het blokschema van *fig. 3* stellen de gedeelten *1* t/m *6* de transducenten en schakelingen voor die deze gegevens ontvangen, en omzetten in gelijkspanningssignalen.

Het uitgangssignaal van de versnellingskiezer (*8* in fig. 3) omvat de spanningen voor de spoelen van de elektrisch bediende kleppen die het overschakelen tot stand brengen, en verder nog twee andere signalen. Deze worden toegevoerd aan de vergelijkschakelingen van de plunjers die de versnellingshefboom in langs- en dwarsrichting bewegen. In deze schakelingen worden de signalen die de gewenste stand van de plunjers aangeven, vergeleken met signalen die overeenkomen met de werkelijke stand.

Als deze signalen niet op elkaar zijn afgestemd, ontstaat een correctiesignaal. Bij een onjuiste stand van de plunjer die de versnellingshefboom in de dwarsrichting moet bewegen, wordt zodoende een signaal teruggevoerd naar de versnellingskiezer. Deze verandert nu het signaal voor de plunjer behorend bij de langsbeweging van de versnellingshefboom, die dan in de neutrale stand wordt gebracht. Een signaal dat aangeeft dat de versnellingshefboom in de langsrichting niet goed staat, blijft aanwezig totdat de desbetreffende plunjer in de juiste stand is gekomen. Dit correctiesignaal opent de hoofdklep, waardoor er oliedruk op de plunjers komt. Tevens wordt de frictie in de ontkoppelde stand gezet en de smoorklep gesloten.

We zien dus dat, als de versnellingskiezer een andere versnelling kiest, achtereenvolgens de volgende handelingen worden verricht.

1) De aan de vergelijkschakelingen toegevoerde signalen veranderen.
2) Doordat de versnellingsbak in een onjuiste stand staat, geven deze schakelingen correctiesignalen.
3) Het correctiesignaal voor de beweging in de langsrichting ontkoppelt de frictie, sluit de smoorklep en opent de hoofdregelklep.
4) De hydraulische plunjers schuiven het versnellingsmechanisme in de nieuwe stand (via de neutrale stand, zo nodig ook met een verstelling in de dwarsrichting); hierna vallen de uitgangsspanningen van de vergelijkschakelingen weg.

Ter voltooiing van het overschakelproces moet nu de frictie weer pakken en de smoorklep weer worden geopend.

Door deze opeenvolgende handelingen kan zeer snel worden overgeschakeld. Door indicators die de stand van de verschillende organen aangeven, kunnen enkele elektrische vergrendelingen worden aangebracht, die bij het optreden van een fout het risico van beschadiging van de versnellingsbak verminderen. Er wordt volledig gebruik gemaakt van het bestaande synchroniseermechanisme en er is geen poging gedaan de synchronisatie tot stand te brengen door twee maal te ontkoppelen („double clutching" ofwel „tussengas geven"). Het toerental van de motor wordt echter naar behoefte door middel van de smoorklep bijgeregeld.

De bediening van de frictie

De frictie moet zeer nauwkeurig worden bediend, zowel bij het optrekken uit stilstand als nadat is overgeschakeld. De meeste moderne fricties hebben een karakteristiek die een grote hysteresis vertoont. Dit wordt

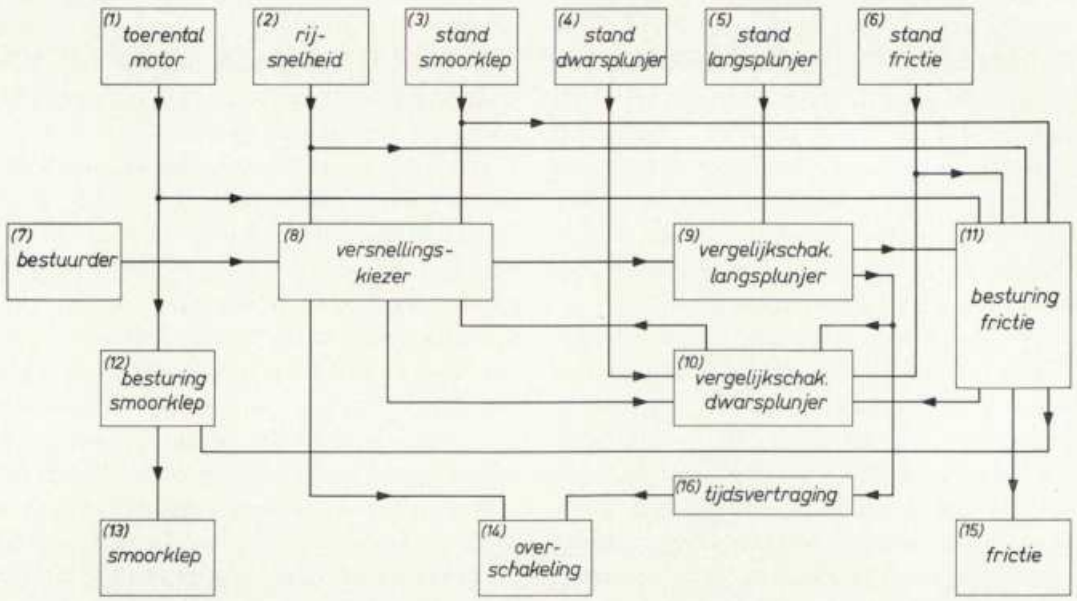


Fig. 3. Blokschema van de elektronische schakeling. *1* . . . *6* transducenten. *8* . . . *12* stuurschakelingen, die de smoorklep, de versnellingsbak en de frictie (*13* . . . *15*) bedienen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

geïllustreerd in *fig. 4*, die voor een normale frictie het verloop weergeeft van het overgebracht koppel als functie van de kracht op de frictiehefboom. Zet men echter de *stand* van de hefboom uit tegen het koppel, dan verkrijgt men een kromme zoals in *fig. 5* is getekend. Deze laatste karakteristiek vertoont slechts zeer weinig hysteresis en hieruit volgt dat voor een ideale regeling van het overgebrachte koppel de stand van de hefboom en niet de hierop uitgeoefende kracht moet worden beheerst.

De elektronische schakelingen leveren een elektrisch signaal dat een maat is voor het gewenste koppel; dit signaal moet door het bedieningsmechanisme van de frictie worden omgezet in een bepaalde stand van de frictiehefboom. Het genoemde mechanisme bestaat uit twee delen:

a) Een draaispoel-servomechanisme, dat de stand van een kleine drukstang nauwkeurig instelt volgens de grootte van een elektrisch ingangssignaal.

b) Een hydraulische krachtversterker, die de geringe kracht van het draaispoelmechanisme versterkt tot een zodanig niveau dat hierdoor de frictiehefboom kan worden bediend.

Door samenwerking van deze beide delen kan de stand van de frictiehefboom — dus het overgebrachte koppel — zeer nauwkeurig door een ingangsspanning worden ingesteld.

De frictie moet in twee gevallen worden gebruikt, nl. bij het optrekken uit stilstand en na het overschakelen.

Gelijkmatig optrekken wordt verkregen door het principe van een centrifugaalkoppeling toe te passen. Dit betekent dat bij stilstand de frictiehefboom naar de gekoppelde stand toe wordt bewogen als het toerental van de motor wordt opgevoerd tot boven het stationaire toerental. Om schokken te voorkomen moet er echter voor worden gezorgd dat de frictie geleidelijk pakt. De bewegingssnelheid van het mechanisme dat de frictie bedient, moet daarom afhankelijk zijn van de afneming van het toerental van de motor.

Om op steile hellingen te kunnen optrekken uit stilstand of om op een vlakke weg een grote acceleratie te kunnen bereiken, moet de frictie volledig pakken bij een toerental waarbij het maximale koppel ongeveer is bereikt (b.v. 2000 omw/min). In sommige situaties moet de frictie echter volledig blijven pakken als het toerental van de motor zakt tot 1000 omw/min. Om aan beide voorwaarden te kunnen voldoen, moet ook de snelheid van de auto invloed hebben op de stand van de frictie, dus op het overgebrachte koppel.

Een geleidelijk pakken van de frictie bij toeneming van het toerental is ook van belang wanneer met de auto gemanoeuvreerd wordt. Het is namelijk moeilijk om het toerental nauwkeurig te regelen met het gebruikelijke bedieningsmechanisme van de smoorklep.

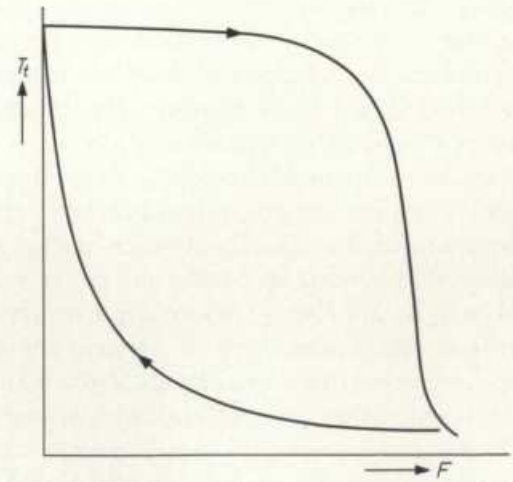


Fig. 4. Kwalitatieve voorstelling van het overgebrachte koppel T_t als functie van de kracht F op de hefboom van de frictie. Er treedt een sterke hysteresis op.

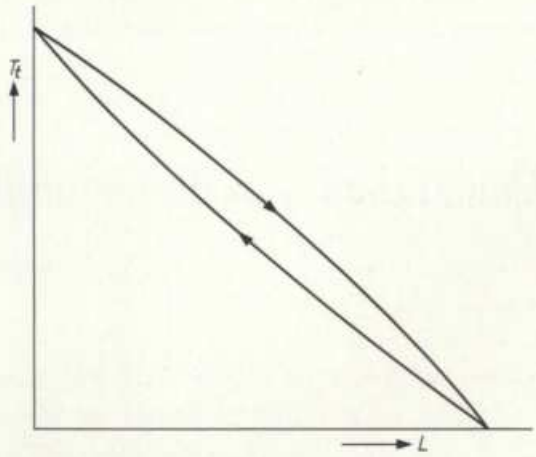


Fig. 5. Het overgebrachte koppel T_t als functie van de stand L van de hefboom van de frictie. Omdat hier veel minder hysteresis optreedt, is het gewenst dat het stuurmechanisme de *stand* van de frictie regelt.

Gedurende het overschakelen moet de frictie ontkoppeld zijn en na het overschakelen moet deze weer zo snel mogelijk pakken. De hinder die wordt ondervonden bij het pakken van de frictie, hangt af van de mate waarin het toerental van de motor is aangepast aan de snelheid waarmee de frictie pakt. De schok die kan worden getolereerd, hangt af van de manier van rijden. Als de bestuurder snel wil accelereren zal hij een grote verandering van de versnelling (dus een grote schok) verwachten; een bestuurder echter die het gaspedaal slechts licht intrapt, zal zelfs een lichte schok in de overbrenging al hinderlijk vinden. Om aan deze verschillende eisen te kunnen voldoen, is de snelheid waarmee de frictie pakt afhankelijk gemaakt van de stand van de smoorklep.

Tijdens het overschakelen van een lagere naar een hogere versnelling (b.v. van de eerste naar de tweede) daalt het toerental van de motor tot de waarde die met

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

de nieuwe transmissieverhouding overeenkomt. Als de frictie weer pakt, daalt het toerental sneller. De daling van het toerental wordt gemeten door een schakeling die de afgeleide naar de tijd van het toerental bepaalt; de uitgangsspanning hiervan wordt gebruikt om de snelheid waarmee de frictie pakt, te verminderen. Door het invoeren van deze terugkoppeling kan men uitgaan van een frictie die na het overschakelen sneller pakt, waardoor de hiervoor benodigde tijd korter wordt, terwijl toch de auto geen sterkere schok ondervindt.

Om deze differentiator ook te kunnen gebruiken bij het terugschakelen (b.v. van de derde naar de tweede), moet tijdens het schakelen het toerental van de motor kunnen toenemen tot een grotere waarde dan nodig is voor de nieuwe versnelling. Dit gebeurt automatisch als de bestuurder zijn voet op het gaspedaal houdt. Om terugschakelen ook mogelijk te maken indien de bestuurder niet accelereert, wordt, als het toerental van de motor lager is dan nodig voor de nieuwe versnelling, de bovengenoemde terugkoppeling uitgeschakeld; het pakken van de frictie vindt dan dus langzaam plaats.

De elektronische besturing van een automatisch transmissiesysteem zoals hier is beschreven, heeft reeds bewezen goed te functioneren. Natuurlijk gebeurt het overschakelen niet zo soepel als met een planetaire versnellingsbak en een koppelomvormer, maar een voordeel van het elektronische systeem is dat hierbij veel minder energieverlies optreedt.

Samenvatting. Beschrijving van een methode om met een conventionele versnellingsbak voor handbediening en een frictie een elektronisch gestuurd automatisch transmissiesysteem te maken. De versnellingsbak en de frictie van een normale auto worden bediend door hydraulische mechanismen. Deze worden gestuurd door signalen van een schakeling die op zijn beurt uit een aantal transducenten gegevens ontvangt omtrent de snelheid van de auto, het toerental van de motor, de stand van de smoorklep, de stand van de versnellingsbak en die van de frictie. De verschillende functies van de schakeling worden beschreven, terwijl verder een blokschema ervan wordt getoond.

Onderzoek van de instabiliteit van spoelen met ferrietkern

C. V. Newcomb en E. C. Snelling

Spoelen met ferrietkern worden in de telecommunicatie-industrie op grote schaal gebruikt in filters [1]. Het is gewenst om met een gegeven aantal spoelen de afsnijkarakteristiek van een filter zo scherp mogelijk te maken; dit betekent dat de schakelingselementen een zo hoog mogelijke kwaliteitsfactor Q moeten hebben. Met de voortschrijdende vermindering van de magnetische verliezen in ferrieten door de verdere ontwikkeling van de materialen, komen hogere kwaliteitsfactoren binnen het bereik (waarden van 1000 zijn tegenwoordig normaal) [2] en kunnen de eigenschappen van de filters verbeterd worden. Een hoge kwaliteitsfactor en een scherpe afsnijding moeten echter gepaard gaan met een hoge graad van constantheid van de parameterwaarden van het schakelingselement in het gebruik. Heeft een filter een scherpe afsnijkarakteristiek waarvan de frequentieligging sterk met de temperatuur of met de tijd verandert, dan kan zijn werking gemiddeld toch minder goed zijn dan die van een minder scherp afsnijdend filter dat beter constant is. De kwestie van de instabiliteit is de laatste tijd onderwerp van speciale aandacht geweest van de afdeling „Ferrieten" van het Mullard-laboratorium. Als instabiliteit wordt daarbij bedoeld elke ongewenste verandering van de waarde van de zelfinductie.

Er zijn vele verschijnselen waardoor de zelfinductie kan veranderen. De waarde kan reversibel veranderen met de temperatuur: de verandering kan dan door een temperatuurcoëfficiënt worden beschreven. De verandering kan echter ook irreversibel zijn, zodat men als functie van de tijd blijvende afwijkingen ziet optreden. Beide soorten veranderingen kunnen te wijten zijn aan het ferriet of aan andere bronnen, zoals de inklemming, kitverbindingen in de kern, de wikkeling en het mechaniek voor het bijstellen van de zelfinductie. In het algemeen zal de waargenomen verandering van de zelfinductie de resultante zijn van een aantal verschijnselen. Van de bijdragen van het ferriet, zowel reversibel als irreversibel, heeft men een vrij goed idee; gewoonlijk worden deze bestudeerd door metingen aan ringvormige proefstukken in plaats van complete spoelen. Het vaststellen van de aard van de overige bijdragen is moeilijker en vereist grote aantallen nauwkeurige zelfinductiemetingen. De gebruikelijke methode is dat men de spoel een groot aantal temperatuurcycli laat doorlopen, zoals in *fig. 1* weergegeven, en dat men in

C. V. Newcomb, A.M.I.E.E. en E. C. Snelling, B.Sc. (Eng.), F.I.E.E., medewerkers van Mullard Research Laboratories, Redhill (Surrey), Engeland.

[1] E. C. Snelling, Ferrite-cored inductors and transformers, Mullard tech. Comm. **9**, 30-42, 1966 (no. 82).

[2] E. C. Snelling, Iso-Q-diagrammen, blz. 287 in dit nummer.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

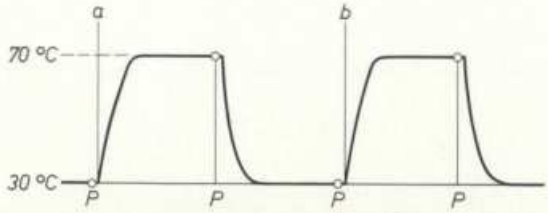


Fig. 1. De temperatuurcyclus voor het onderzoek van spoelen met ferrietkern. Op de tijdstippen *P* wordt de zelfinductie gemeten. De duur van de volledige cyclus *a-b* is 4 uur.

elke cyclus de zelfinductie op de beide constante temperatuurniveaus meet. Door de temperatuurwisseling kan men de gemiddelde temperatuurcoëfficiënt bepalen, en de met de tijd voortschrijdende veranderingen worden erdoor versneld. Opeenvolgende metingen van de zelfinductie bij steeds dezelfde temperatuur geven een aanwijzing omtrent het verloop van de zelfinductiewaarde dat men in het gebruik mag verwachten.

Om een bepaalde instabiliteitsoorzaak te isoleren en te identificeren, is het gewenst de metingen te doen aan proefstukken die ten opzichte van alle andere oorzaken zijn gestabiliseerd. Dit is niet altijd mogelijk en het kan dus nodig zijn een groot aantal vergelijkende waarnemingen te doen. Een eerste vereiste is dat door de meetmethode geïntroduceerde valse variaties zo klein gehouden worden dat zij de gevraagde uitkomsten niet overschaduwen. Er is in dit laboratorium een speciale apparatuur ontwikkeld waarmee de metingen automatisch kunnen worden verricht en waarmee uitgebreide onderzoekingen kunnen worden ondernomen die met de vroegere niet geautomatiseerde techniek ten ene male onmogelijk geweest zouden zijn.

Alvorens deze apparatuur te beschrijven, zij erop gewezen dat tegenwoordig aan de spoelen soms de eis gesteld wordt dat zij in een gebruiksduur van 20 jaar minder dan 5×10^{-4} veranderen. Bijdragen van 1×10^{-4} tot het totale verloop zijn derhalve al belangrijk, en om deze met zekerheid te kunnen aantonen, moet de nauwkeurigheid van de meting ongeveer $0{,}3 \times 10^{-4}$ bedragen. De apparatuur moet daartoe zeer goed gestabiliseerd zijn, vooral wat betreft de instelling van de temperatuur.

De apparatuur voor het registreren van de instabiliteit

De te onderzoeken spoelen met ferrietkern worden in een meetkamer geplaatst waarvan men de temperatuur met behulp van een programmeerinrichting de gewenste cyclus laat doorlopen. Deze cyclus is in fig. 1 weergegeven. Bij elke temperatuur krijgen de spoelen minstens een uur tijd om te acclimatiseren. Daarna worden de spoelen achtereenvolgens door de programmeer-inrichting op een oscillator aangesloten waarin zij als frequentiebepalend element fungeren. De oscillatiefrequentie wordt automatisch gemeten, en de uitkomst wordt uitgetypt en tevens in band geponst. Als alle spoelen op deze wijze gemeten zijn, wordt de oventemperatuur door de programmeerinrichting weer op de andere waarde ingesteld. De volledige cyclus duurt 4 uur, zodat per week 42 cycli kunnen worden doorlopen; maximaal kunnen 22 spoelen tegelijk worden onderzocht. *Fig. 2* geeft een blokschema

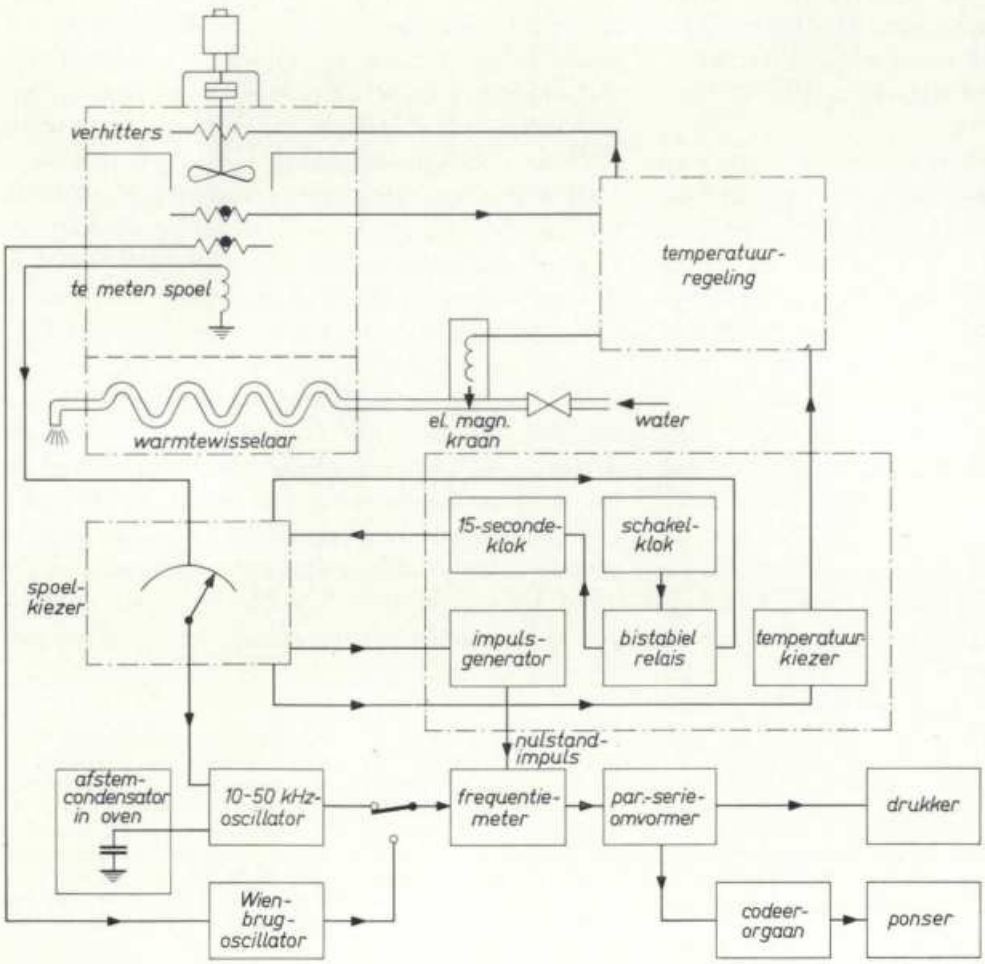


Fig. 2. Blokschema van de apparatuur voor het meten en registreren van de instabiliteit.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

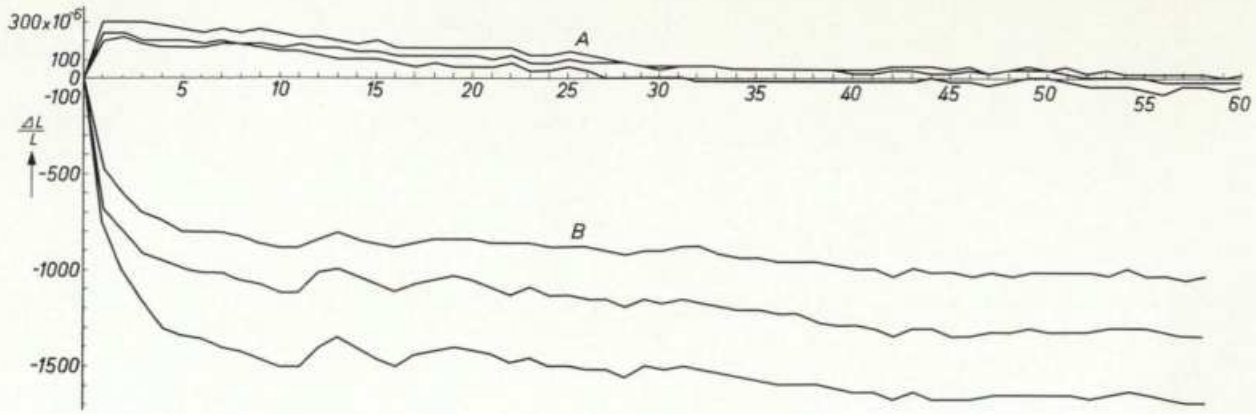


Fig. 3. Voorbeeld van resultaten, uitgezet door de rekenmachine. Men ziet hier het verloop van de zelfinductie dat te wijten is aan de kitverbinding in 25-mm-potkernen van ferriet. De verandering van de zelfinductie, gemeten in het 30 °C-punt van opeenvolgende cycli, is uitgezet tegen het aantal temperatuurcycli. De curven hebben betrekking op kernen met een goed (*A*) dan wel een slecht (*B*) plakmiddel.

van de apparatuur.

De meetkamer heeft een nuttige ruimte van 0,1 m³. Er wordt een snelle luchtstroom doorgeblazen. Door kanalen langs de achter- en onderzijde van de kamer is een gesloten circulatiesysteem verkregen; in deze kanalen stroomt de lucht langs de verhittingselementen en een met water gekoelde warmtewisselaar. Deze laatste komt aan het einde van elke hoge-temperatuurperiode in werking om de afkoelsnelheid te vergroten. De verhittingselementen worden bestuurd door het correctiesignaal van een met wisselstroom gevoede thermistorbrug via een fazegevoelige detectorschakeling. De regelnauwkeurigheid is $\pm$ 0,1 °C.

De oscillator werkt met parallelresonantie en heeft weerstandsstabilisatie. De condensatoren van de resonantiekring zijn micacondensatoren met zilverelektrodes; deze bevinden zich in een kleine oven, die op 50 $\pm$ 0,5 °C wordt gehouden. Er zijn vijf condensatoren ter keuze, waarmee een zelfinductiegebied van 200 µH tot 55 mH, bij een frequentiegebied tussen 10 en 50 kHz, kan worden bestreken.

De programma-inrichting stelt de ponser in werking, regelt het schakeltempo van de spoelkiezer en stelt de frequentiemeter telkens in op de beginstand. De 25-staps-spoelkiezer blijft in iedere stand 15 s staan om voldoende tijd te bieden voor de integratieperiode van de frequentiemeter. Deze werd op 10 s gesteld waarmee een voldoende nauwkeurigheid wordt bereikt. De oventemperatuur wordt gecontroleerd met behulp van een thermistor die de frequentie van een Wien-brugoscillator beïnvloedt; deze frequentie wordt eveneens geregistreerd.

Voor het verwerken van de gegevens die op de ponsband zijn vastgelegd, is een rekenmachineprogramma gemaakt. Hiermee wordt uit de frequentiewaarnemingen de verandering van de zelfinductie afgeleid, en voor elke spoel worden automatisch de gemeten afwijking en de temperatuurcoëfficiënt uitgezet. De machine kan ook meteen de gemiddelde resultaten voor een groep nominaal identieke spoelen leveren.

De apparatuur is nu sinds ongeveer 18 maanden in gebruik. De uitgevoerde onderzoekingen betroffen de instabiliteitsbijdragen van oorzaken gelegen buiten het ferriet. In het bijzonder hebben we hiermee de bijdragen kunnen isoleren die het mechaniek voor het bijstellen van de zelfinductie levert, en als resultaat hiervan is een verbeterde constructie ingevoerd. De apparatuur is verder gebruikt voor een uitgebreid onderzoek van plakmiddelen voor het aan elkaar kitten van de ferrietkernhelften. *Fig. 3* laat als voorbeeld een reeks resultaten zien, zoals de rekenmachine die heeft uitgezet.

Onlangs is een veelzijdiger meetkamer geconstrueerd, die naast de reeds beschrevene zal worden gebruikt. De regel- en meetapparatuur met de registratie is voor beide kamers gemeenschappelijk. Bij de nieuwe kamer zal een grote verscheidenheid van temperatuurcycli kunnen worden gekozen of van te voren ingesteld; de cyclus kan nu tot twaalf stappen bevatten en het gebied van —50 tot +100 °C beslaan. Toekomstige onderzoekingen zullen o.a. gericht zijn op een vergelijking van mechanische methodes voor het aan elkaar bevestigen van de ferrietkernhelften en met name op de wijze waarop de permeabiliteits-temperatuurkromme in een groot temperatuurgebied wordt beïnvloed door de grootte van de klemkracht, door de keuze van het aangrijpingspunt hiervan en door de montagetechniek.

Samenvatting. Door verbetering van de ferrietmaterialen heeft men de kwaliteitsfactor van filterspoelen met ferrietkern telkens kunnen verhogen; hand in hand hiermee moet een overeenkomstige verbetering van de stabiliteit van de zelfinductie gaan. Er zijn vele verschijnselen die ongewenste veranderingen van de zelfinductie kunnen veroorzaken, en er zijn grote aantallen zeer nauwkeurige metingen nodig om deze oorzaken te isoleren en te identificeren. Voor dit doel is een automatische apparatuur ontworpen. Deze wordt hier beschreven en als voorbeeld worden enige resultaten weergegeven.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Iso-*Q*-diagrammen

De afdeling „Ferrieten" van het Mullard-laboratorium houdt zich sinds enige tijd bezig met een analyse van de kwaliteitsfactor van spoelen. *Fig. 1* laat zien hoe de totale verlieshoek en de verschillende bijdragen hiertoe voor een bepaalde spoelconstructie met de frequentie variëren. De kwaliteitsfactor Q is de reciproke waarde van de tangens van de totale verlieshoek. Kan men alle verliescomponenten voor willekeurige afmetingen en ferrietsoort van de kern, effectieve permeabiliteit, draadmateriaal en windingstal als functie van de frequentie uitdrukken, dan kan de desbetreffende Q-kromme worden bepaald. Door met behulp van een

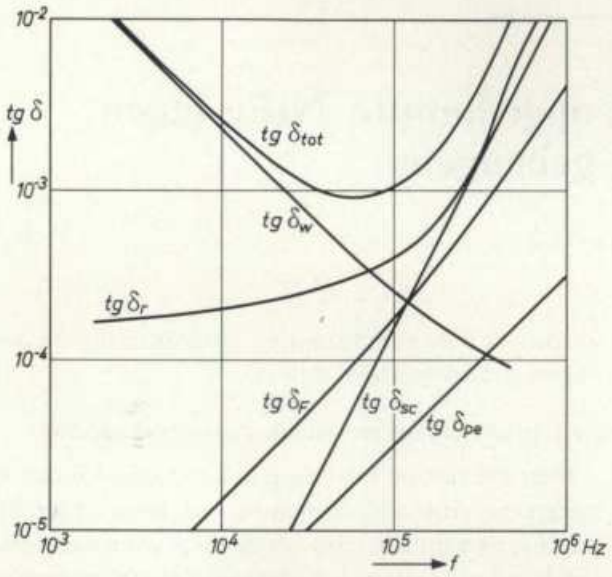


Fig. 1. Totale verlieshoek en bijdragen hiertoe, als functie van de frequentie f voor een spoel met een 25-mm-potkern van ferriet, effectieve permeabiliteit 160, volledig bewikkeld met 62 windingen van litzedraad bestaande uit 140 draadjes van 0,04 mm diameter; zelfinductie 2,1 mH. Tg δ_{tot} is de tangens van de totale verlieshoek, tg δ_w is de bijdrage van de weerstand van de wikkeling, tg δ_r van de restverliezen in de kern, tg δ_{sc} van de eigen capaciteit van de wikkeling, tg δ_F van de wervelstroomverliezen in de kern, tg δ_{pe} van de wervelstroomverliezen in de wikkeling.

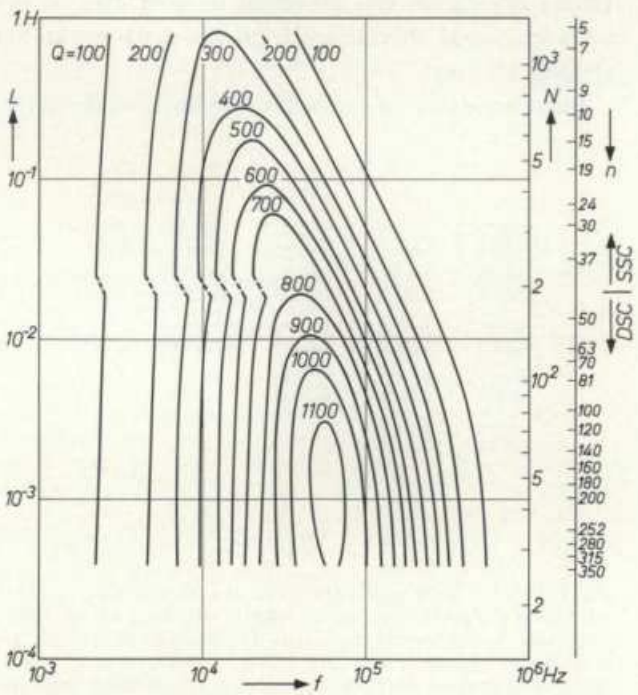


Fig. 2. Iso-Q-diagram voor een spoel met een 25-mm-potkern van ferriet, effectieve permeabiliteit 160, volledig bewikkeld met litzedraad, diameter der draadjes 0,04 mm. n aantal draadjes. N windingstal. L zelfinductie. SSC = enkel omsponnen, DSC = dubbel omsponnen draad.

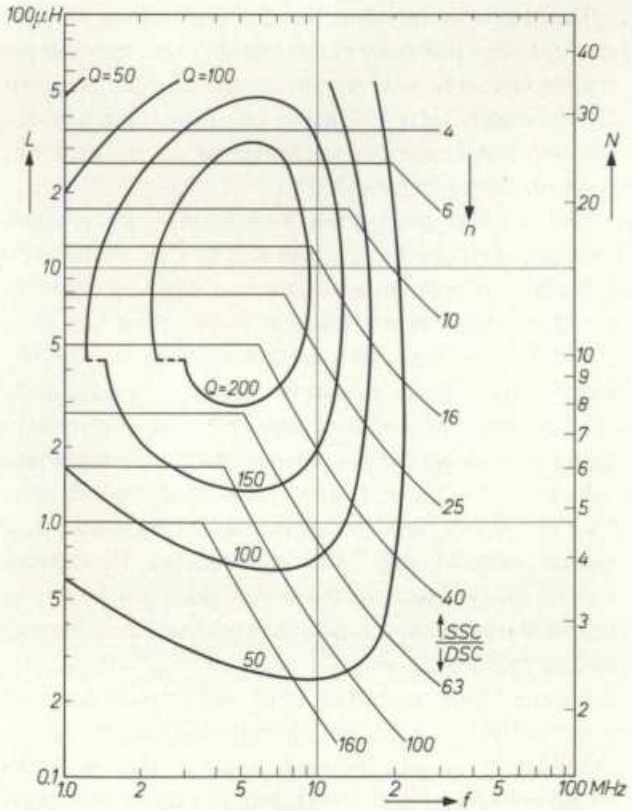


Fig. 3. Iso-Q-diagram voor een hoogfrequentspoel met een 14-mm-potkern van ferriet, effectieve permeabiliteit 25, bewikkeld met één enkele laag van litzedraad met draadjes van 0,04 mm diameter. Het vereiste aantal draadjes kan op de eroverheen getekende krommenschaar worden afgelezen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

elektronische rekenmachine de Q voor elke combinatie van bovengenoemde gegevens te berekenen, kan men Q-krommen voor alle voorkomende spoelontwerpen verkrijgen. Voor de praktijk is het handig deze in de vorm van iso-Q-diagrammen weer te geven, zie *fig. 2*. We hebben meer dan 200 van dergelijke diagrammen berekend [1].

In de laatste tijd wordt vooral aan het probleem van spoelen voor hoge frequenties gewerkt. Ook voor zulke spoelen hebben wij iso-Q-diagrammen berekend, waarbij aangenomen is dat de wikkeling uit één laag bestaat; met een over het diagram getekende krommenschaar kan men de voor een bepaalde waarde van Q vereiste draaddiameter of het vereiste aantal draadjes van litzedraad bepalen. Zo'n diagram is weergegeven in *fig. 3*.

E. C. Snelling

[1] E. C. Snelling, Ferrite-cored inductors and transformers, Mullard tech. Comm. **9**, 30-42, 1966 (no. 82).

E. C. Snelling, B.Sc. (Eng.), F.I.E.E., medewerker van Mullard Research Laboratories, Redhill (Surrey), Engeland.

Kritische parameters van opgedampte NiFe-lagen voor snelle geheugens

R. V. Peacock

Bij het ontwikkelen van rekenmachines schenkt men veel aandacht aan het verhogen van de rekensnelheid. Belangrijke verbeteringen kunnen hierbij alleen worden bereikt als de snelheid van de geheugens aanzienlijk wordt verhoogd.

Een magnetische dunne laag, gebruikt als geheugenelement, kan intrinsieke schakeltijden vertonen die ten minste een orde van grootte korter zijn dan die van ferrietkerntjes. Het toepassen van deze lagen kan dus een grote vooruitgang opleveren in de snelheid van rekenmachinegeheugens.

Een dergelijk geheugenelement bestaat uit een laagje van een magnetische legering met b.v. de afmetingen 1,0 mm × 0,5 mm en een dikte van ongeveer 100 nm. Een geheugen bestaat uit een groot aantal van deze elementjes, gerangschikt in de vorm van een matrix. Het wordt vervaardigd door in vacuüm een nikkel-ijzerlegering door een masker op een verhit substraat te dampen, waarbij het substraat zich in een magnetisch veld bevindt. Dit veld veroorzaakt in de opgedampte laag een voorkeursrichting van de magnetisatie, ook wel de „gemakkelijke" richting genoemd. De richting van de magnetische vector in het geheugenelement is dus in de stabiele toestand evenwijdig met deze gemakkelijke richting en wijst → of ← naar gelang het element zich in de toestand „1" of „0" bevindt. De richting loodrecht op de gemakkelijke richting wordt de „moeilijke" richting genoemd. In dit artikel wordt getoond welke invloed de parameters van de geheugenelementen hebben op het ontwerp van het geheugen en worden de vele compromissen besproken die de ontwerper gedwongen is te sluiten.

R. V. Peacock, Ph.D., medewerker van Mullard Research Laboratories, Redhill (Surrey), Engeland.

De kritische parameters van de geheugenelementen

Naar het zich op het ogenblik laat aanzien, komt de korte schakeltijd van elementen van dunnelaaggeheugens het best tot zijn recht als de matrix van elementen wordt gebruikt als een orthogonaal woordgeheugen. Deze methode om een geheugen in te richten, is beschreven in de literatuur [1]; in het kort werkt het systeem als volgt.

In de matrix van *fig. 1* bevat elke horizontale rij ele-

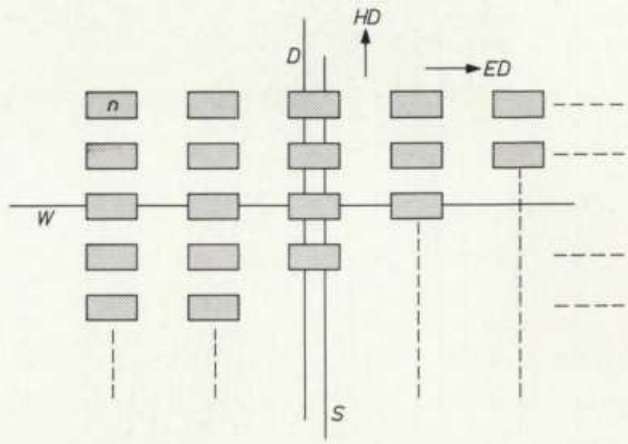


Fig. 1. Schematische voorstelling van een matrix van magnetische dunnelaagelementen n; in elke horizontale rij elementen wordt een binair woord geplaatst. *ED* voorkeursrichting („gemakkelijke" richting), *HD* „moeilijke" richting van de magnetisatie. Een stroom door de woorddraad W passeert een volledige rij elementen evenwijdig met hun voorkeursrichting; op deze wijze kan de binaire informatie die in de elementen is opgeslagen, worden gelezen. De polariteit van het signaal dat in de leesdraad S wordt geïnduceerd, leert of er een „1" of een „0" in het element stond. De informatie wordt in de elementen geschreven door een stroom te sturen door de cijferdraad D.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

menten een binair woord (*fig. 2a*). Het lezen van een woord gebeurt door stroom te sturen door een „woord"-draad, die over elk element van het woord loopt, evenwijdig met de voorkeursrichting; door het resulterende veld draait de magnetisatie van elk elementje naar de moeilijke richting (fig. 2*b*). Deze draaiing induceert een signaal in een „lees"-draad; over elk elementje loopt een dergelijke draad evenwijdig met de moeilijke richting. De polariteit van dit signaal hangt ervan af of het geheugenelementje een „1" of een „0" bevatte. Het uitgangssignaal wordt door een zg. leesversterker op het niveau gebracht dat nodig is om de daaropvolgende logicaschakelingen te sturen, en wordt opgeslagen in een „staticizer", een soort bistabiele wipschakeling.

Terwijl de elementen onder invloed van het woordveld zijn gemagnetiseerd in hun moeilijke richting, worden stroomimpulsen door de „cijfer"-draden gevoerd die boven de elementjes lopen in de richting loodrecht op de woorddraden. Als gevolg van de velden die door deze cijferstromen worden opgewekt, draait de magnetisatie van elk elementje zodanig dat ze een hoek gaat maken met de moeilijke richting (fig. 2*c*). Als nu het woordveld wordt weggenomen, komt de magnetisatie terug in de voorkeursrichting en wel met een polariteit die is bepaald door de richting van de cijferstroom (fig. 2*d*). Men dient er uiteraard voor te zorgen dat de cijferimpulsen, die informatie in het geselecteerde woord moeten schrijven, de elementen van de ongeselecteerde woorden niet kunnen beïnvloeden.

Deze organisatie van het geheugen heeft als consequentie dat de ontwerper zich in de eerste plaats moet bezighouden met zes kritische parameters van de geheugenelementen.

a) De kleinste woordstroom in een draad boven het element waarmee nog behoorlijk te lezen en te schrijven valt (Dit is van invloed op het ontwerp van de schakeling voor de woordstroom).
b) Het uitgangssignaal van een geheugenelementje bij een bepaalde stijgtijd van de woordstroom (Dit is van invloed op het ontwerp van de leesversterker).
c) De kleinste cijferstroom waarbij nog is verzekerd dat informatie in elk willekeurig element van het geheugen kan worden geschreven, ongeacht de polariteit (dit geeft de minimale eisen die gesteld moeten worden aan de stroom die de cijferschakeling levert).
d) De grootste cijferstroom die nog kan worden toegepast zonder dat informatie in niet-geselecteerde elementen wordt verstoord, ook als de meest ongunstige reeks bewerkingen aan andere elementen wordt uitgevoerd.
e) Het absolute en procentuele verschil tussen (c) en (d) (dit is van invloed op de begrenzingen van het ontwerp van de cijferschakeling).
f) De grootte van het element (dit beïnvloedt niet alleen de totale afmetingen van het geheugen, maar ook de tijd die nodig is om signalen naar het geselecteerde element te leiden en eraan te onttrekken).

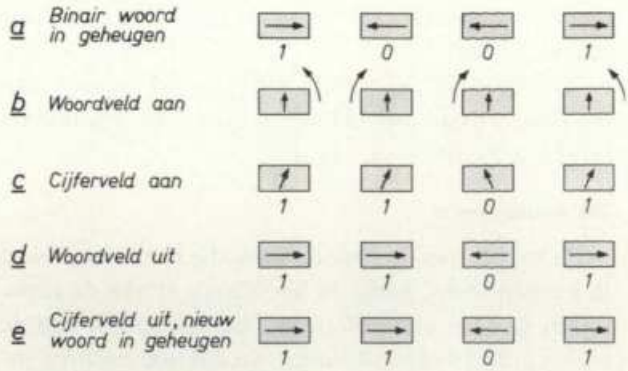

a Binair woord in geheugen
1 0 0 1
b Woordveld aan
c Cijferveld aan
1 1 0 1
d Woordveld uit
1 1 0 1
e Cijferveld uit, nieuw woord in geheugen
1 1 0 1

Fig. 2. De werking van een orthogonaal woordgeheugen.

Deze parameters zijn functies van:

1) de afmetingen van de geheugenelementen (lengte, breedte, en dikte),
2) het anisotropieveld H_K (dit is een maat voor de anisotropie, nl. het veld dat in de moeilijke richting moet worden aangelegd om de anisotropie op te heffen),
3) de spreiding van de anisotropie zowel in richting als in grootte,
4) de interne ontmagnetiserende velden,
5) de deviatie van de voorkeursrichting ten opzichte van de gewenste richting,
6) de „kruip"-drempel gemeten bij het sterkste impulsvormige veld in de moeilijke richting dat tijdens de werking van het geheugen optreedt.

Aangezien een aantal van de kritische parameters (a)-(f) functies zijn van enkele van de hierboven genoemde variabelen — zo is b.v. (c) een functie van (1), (2), (3), (4) en (5) —, wordt de ontwerper geconfronteerd met een ingewikkeld stelsel van simultane relaties. Indien de zes variabelen onafhankelijk zouden zijn, en indien de ontwerper zou weten in welke mate hij een compromis zou kunnen bereiken, b.v. tussen de parameters (a) en (b), dan zou het probleem niet zo onhandelbaar zijn. Zelfs bij één bepaalde samenstelling van de laag echter zijn er reeds een aantal variabelen op ingewikkelde wijze met elkaar verbonden. Zo zijn b.v. (2), (3), (5) en (6) zowel afhankelijk van de omstandigheden bij het opdampen (temperatuur van het substraat, vacuüm, opdampsnelheid, veld bij het opdampen) als van de eigenschappen van het substraat. Het is

[1] J. I. Raffel, T. S. Crowther, A. H. Anderson en T. O. Herndon, Proc. IRE **49**, 155, 1961.
E. M. Bradley, J. Brit. I.R.E. **20**, 765, 1960.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

daardoor moeilijk om een optimaal geheugenelement te verkrijgen.

We willen in dit artikel een overzicht geven van de belangrijkste betrekkingen tussen de parameters (a)-(f) en de variabelen (1)-(6).

De woordstroom

De sterkte van de stroom die nodig is om een woord te kunnen lezen, hangt in hoofdzaak af van de afmetingen van het element en van de anisotropie van de laag. In dit hoofdstuk zullen we daarom eerst de invloed bespreken van de afmetingen van het element, en daarna de wijze waarop de anisotropie afhangt van de samenstelling van de laag en de omstandigheden bij het opdampen.

Verband tussen grootte van het element en woordstroom

Men zou verwachten dat voor een element van een bepaald materiaal en met een bepaalde anisotropie het veld dat door de woordstroom opgewekt moet worden, onafhankelijk is van de breedte van het element in de moeilijke richting. Om twee redenen is dit niet het geval. Ten eerste heeft men dan geen rekening gehouden met de kromming van de magnetische inductielijnen bij de randen van het element, die optreedt wanneer het grootste deel van de magnetisatie in de moeilijke richting wordt gedraaid [2], en ten tweede is geen rekening gehouden met de vorm-anisotropie.

In dit laboratorium is een uitgebreide reeks metingen verricht aan quasi-elliptische elementen [3]; het woordveld H_w dat nodig is om 80% van het grootst mogelijke uitgangssignaal te krijgen, bleek voor heel kleine elementen (ca. $\frac{1}{4}\times\frac{1}{2}$ mm) enkele oersteds groter te zijn dan het intrinsieke anisotropieveld H_K van het materiaal (*fig. 3*). Verder bleek er een goede overeenstemming te bestaan met het theoretische verband dat Bonyhard en Buckingham [2] hebben afgeleid voor de kromming van de inductielijnen aan de rand van een element.

Het vorm-anisotropieveld is zelfs voor kleine elementen met een extreme verhouding tussen lengte en breedte slechts ongeveer 1 oersted. Dit is in de meeste gevallen slechts ongeveer 20% van de grootte van het effect veroorzaakt door de kromming van de inductielijnen. Wegens de onregelmatige verdeling van de magnetisatie in een element tijdens het lezen, kunnen we dus concluderen dat de breedte van het element in de moeilijke richting een groot en voorspelbaar effect heeft op het woordveld dat vereist is voor een goede werking van het geheugen.

Invloed van samenstelling en opdampomstandigheden op de anisotropie

Bij een bepaalde grootte van een element is de stroom die nodig is om de informatie te lezen, afhankelijk van de intrinsieke anisotropie van het element. Voor NiFe-legeringen is het verband tussen de anisotropie en de samenstelling thans goed bekend [4]. In *fig. 4* zien we dat men wat dit betreft met een Ni-gehalte van 80-90% zou moeten werken. Er zijn echter andere overwegingen (b.v. de magnetostrictie en de daarmee verband houdende kwestie van de anisotropie die samenhangt met de invalshoek van de dampbundel gedurende het opdampen) die in sterke mate de voorkeur doen gaan naar het laagste gedeelte van dit gebied; voor de meeste geheugenelementen wordt dan ook een legering met 80 tot 82% Ni gebruikt.

Als de samenstelling bekend is, is de anisotropie van het element nog een functie van de temperatuur die het substraat tijdens het opdampen had. In het algemeen neemt de geïnduceerde anisotropie af bij toenemende substraattemperatuur, maar er zijn aanwijzingen dat de

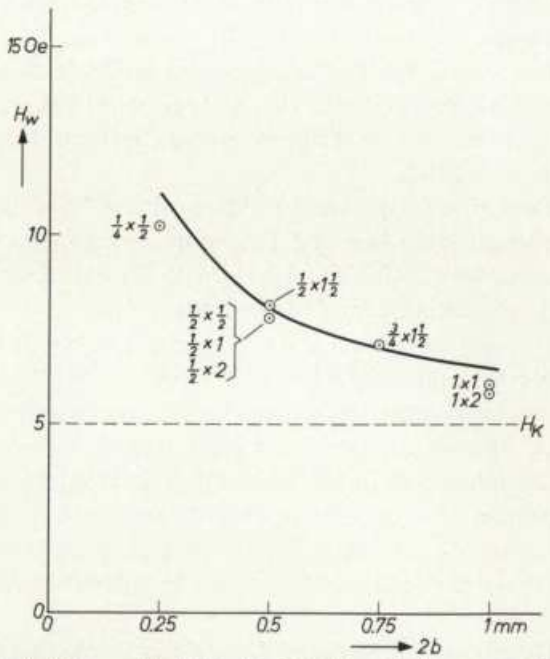


Fig. 3. Het woordveld H_w (in Oe) dat nodig is om een fractie 0,8 van de magnetisatie van een element in de moeilijke richting te draaien, uitgezet als functie van de breedte $2b$ van het element in de moeilijke richting (in mm), en wel voor een element met een intrinsiek anisotropieveld van 5 Oe, een verzadigingsmagnetisatie van 800 e.m.e. en een dikte van 85 nm. De kruisjes geven de waarden aan die zijn gemeten voor een aantal quasi-elliptische elementen. De kromme is uitgerekend volgens de formule van Bonyhard en Buckingham [2].

[2] P. I. Bonyhard en I. C. Buckingham, IEEE Trans. on magnetics **MAG-1**, 258, 1965.
[3] M. J. Folkes en G. Winsor, Int. J. Control **3**, 513, 1966 (no. 6).
[4] G. Robinson, Proc. Leuven Conf. on the electric and magnetic properties of thin metallic layers, blz. 140, 1961.
[5] J. H. Engelman en A. J. Hardwick, Trans. 9th Nat. Vac. Symp., blz. 100, 1962.
[6] B. R. Hearn, J. Electronics and Control **16**, 33, 1964.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

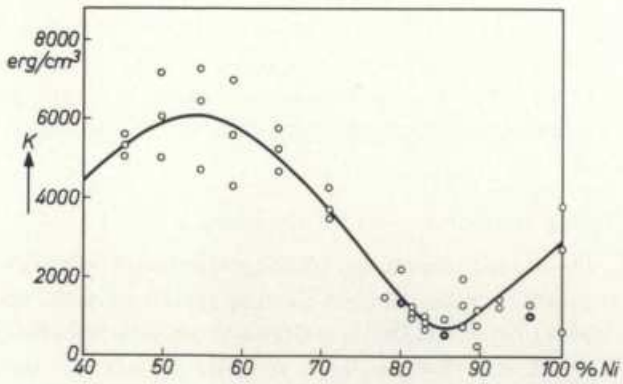


Fig. 4. De anisotropieconstante K uitgezet tegen het percentage Ni in de NiFe-laag. Er is een minimum van K bij een Ni-gehalte dat tussen 80 en 90 % ligt.

anisotropie boven ongeveer 400 °C weer sterk stijgt [5]. De temperatuur waarbij de anisotropie het kleinst is, hangt af van de opdampsnelheid; hoe hoger deze snelheid is, des te hoger is de optimale substraattemperatuur.

In het algemeen worden deze hoge temperaturen in de praktijk echter niet gebruikt, aangezien bij zeer hoge substraattemperaturen de spreiding en de afwijking van de voorkeursrichting in het element groot zijn.

Uit het bovenstaande zal duidelijk zijn geworden dat, hoewel men in staat is NiFe-lagen op te dampen met een klein anisotropieveld, de ontwerper van een dunnelaaggeheugen een compromis moet zoeken tussen enerzijds de kleinst mogelijke anisotropie en anderzijds de grotere afwijking, spreiding en magnetostrictie die met deze geringe anisotropie samenhangen. In de volgende hoofdstukken zal blijken dat men bij het ontwerpen van dunnelaaggeheugens velerlei aspecten ontmoet die soortgelijke beslissingen vereisen.

De uitgangssignalen van een element

Als de magnetisatie in een dunnelaaggeheugenelement door een snel aangelegd magnetisch veld (b.v. met een stijgtijd $\tau_r = 2{,}5 \times 10^{-10}$ s) in de moeilijke richting wordt gedraaid, voert de magnetisatie tussen begin- en eindstand een precessie-beweging uit volgens een vlakke elliptische spiraal [6]. De uitgangsspanning in een lus die om het element is aangebracht in een vlak evenwijdig met de moeilijke richting, heeft de vorm van een gedempte trilling (*fig. 5*), wat geheel overeenkomt met de verwachtingen. Als een veld van de orde van grootte van het anisotropieveld H_K, of enkele malen zo sterk, wordt opgewekt met een lagere snelheid (b.v. $\tau_r \geqq 5$ ns), is de situatie in feite zo dat de magnetisatie het veld „volgt", zodat bij elke gegeven veldsterkte de magnetisatie de richting heeft die optreedt bij een constant veld van deze sterkte. Het is dan ook duidelijk dat, als de informatie uit een geheugenelement wordt gelezen door de magnetisatie (of een vast deel ervan) in de moeilijke richting te draaien, de hoogste waarde van de spanning die in het leessysteem wordt geïnduceerd, omgekeerd evenredig is met de stijgtijd. Voor de ontwerper is het kiezen van deze stijgtijd een zeer lastige zaak; tegenwoordig werkt men meestal met een waarde van 5-30 ns.

Men zou verwachten dat bij een gegeven stijgtijd de uitgangsspanning evenredig zou zijn met het oppervlak van de doorsnede van het elementje in de moeilijke richting. Nu wordt de maximale dikte van een geheugenlaag door andere factoren beperkt tot ongeveer 100 nm of minder. Men heeft dus alleen de vrijheid om de lengte in de gemakkelijke en in de moeilijke richting te variëren. *Fig. 6* geeft de uitgangsspanning V_0 van quasi-elliptische elementen met verschillende afmetingen en vormen, voor het geval dat een vast deel ($\approx 0{,}8$) van

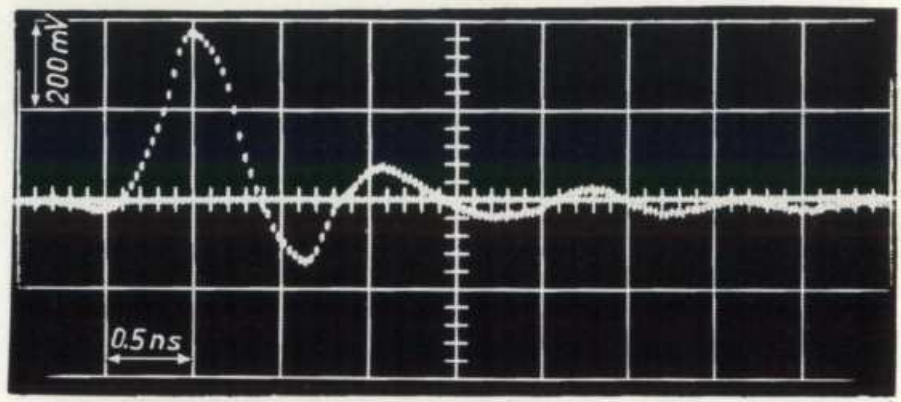


Fig. 5. Karakteristieke trillingsvorm bij het schakelen naar de moeilijke richting van een NiFe-geheugenelement met 80 % Ni. Het aangelegde veld was 7 Oe en H_K van het element was 4 Oe. De verticale schaal geeft de uitgangsspanning V_0.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

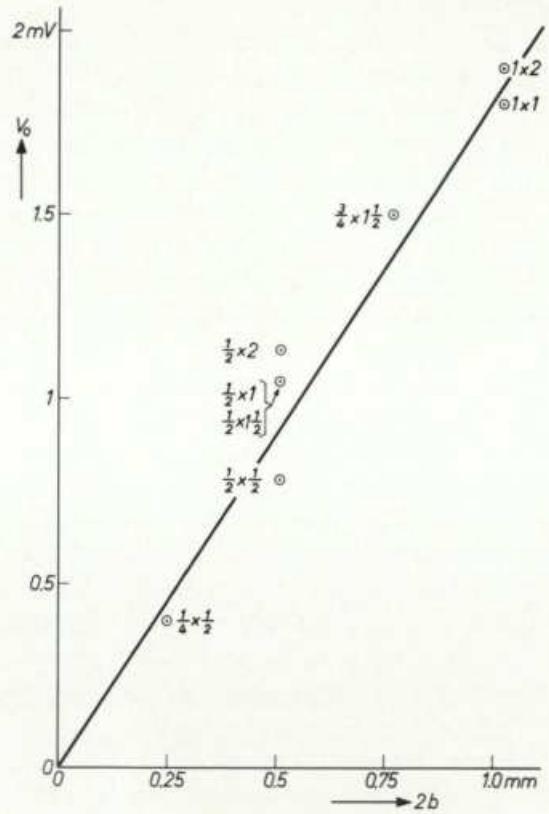


Fig. 6. De gemeten waarden van de uitgangsspanning V_0. Het uitgangssignaal bij een woordimpuls met een stijgtijd van 20 ns is uitgezet tegen de breedte $2b$ van het element in de moeilijke richting. Zoals te verwachten was, is het verband lineair.

de magnetisatie in de moeilijke richting wordt gedraaid bij een stijgtijd van het woordveld van 20 ns. Zoals te verwachten was, liggen de punten ruwweg op een rechte lijn door de oorsprong.

Op deze plaats dient nog vermeld te worden dat, door de spreiding die de grootte van H_K binnen een element vertoont [7], en door het krommingseffect dat hierboven is vermeld, gewoonlijk een woordveld moet worden gebruikt dat veel sterker is dan het gemeten intrinsieke anisotropieveld dat het element vertoont voordat de uitgangsspanning de maximumwaarde nadert.

Het kleinste cijferveld dat nog informatie in een element kan schrijven

Bij een ideaal geheugenelement zou men verwachten dat als het woordveld groter dan of gelijk aan het anisotropieveld is, reeds een oneindig zwak cijferveld in staat zou zijn om de magnetisatie in de geselecteerde voorkeursrichting te draaien. Bij een werkelijk element gaat dit niet op, en wel om de volgende drie redenen:

a) Er is een invloed van de vorm van het element en van ontmagnetiserende velden.
b) De gemiddelde voorkeursrichting kan een deviatie vertonen ten opzichte van de lengteas van het element.
c) Er is een invloed van de spreiding van de voorkeursrichting binnen een element.

In de volgende hoofdstukken zullen we het verband bespreken tussen deze drie factoren en het vereiste cijferveld.

Invloed van de vorm van het element

De invloed van H_d, het ontmagnetiserende veld in de voorkeursrichting van een element zonder deviatie, op de schijnbare spreiding is onderzocht door Metzdorf [8]. Stel dat een element onder de invloed staat van een woordveld in de moeilijke richting en een cijferveld in de voorkeursrichting. Het resulterende veld dat op het materiaal van het element werkt, is dan de vectorsom van de aangelegde velden plus het ontmagnetiserende veld van het element. Het schakelgedrag van het element zal er nu van afhangen hoe de amplitude en de richting van dit resulterende veld zich verhouden tot de schakeldrempel van het materiaal van het element.

Uit een vereenvoudigde berekening [3] van dit cijferveld volgt dat, voor een element zonder deviatie en met een kleine spreiding, het cijferveld dat nodig is om dit effect teniet te doen, evenredig is met $(H_d)^{3/2}/(H_K)^{1/2}$. Dit verband schijnt binnen de grenzen van de experimenten inderdaad geldig te zijn.

Uit het bovenstaande volgt het paradoxale feit dat de vereiste stroom kleiner is naarmate een element in de voorkeursrichting groter en dus de cijferdraad breder is. Men zou hieruit kunnen concluderen dat het in de praktijk voordelig is de elementen lang te maken in de voorkeursrichting. Dit is echter niet waar als gevolg van de deviatie. Deze zal in het volgende hoofdstuk worden besproken.

Invloed van de deviatie

Als een ideaal geheugenelement, zonder spreiding van de anisotropie in richting of grootte, zodanig zou zijn opgedampt dat zijn gemiddelde voorkeursrichting een hoek Θ zou afwijken van de richting van het cijferveld, dan zou het kleinste cijferveld dat nog informatie in dit element kon schrijven $H_K \sin \Theta$ zijn. Als er bovendien nog een spreiding is in de grootte of de richting van de anisotropie, dan moet dit veld nog sterker zijn.

De deviatie van een element in een opgedampte geheugenmatrix is voornamelijk afhankelijk van de invalshoek van de opdampbundel ten opzichte van het oppervlak. De mate waarin deze invalshoek de voor-

[7] B. R. Hearn, Proc. Leuven Conf. on the electric and magnetic properties of thin metallic layers, blz. 167, 1961.
[8] W. Metzdorf, rapport Siemens und Halske, 1963.
[9] D. O. Smith, M. S. Cohen en G. P. Weiss, Lincoln Labs. Report 53G-0037, 1960.
[10] S. G. Fleet, M.R.L. Report no. 466, maart 1963.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

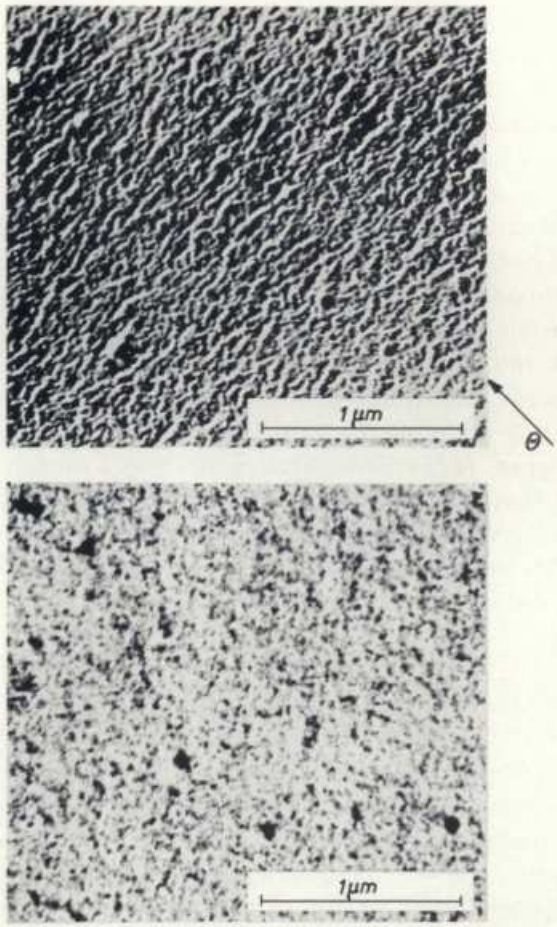


Fig. 7. Elektronenmicrofoto van de structuur van een Ni-laag op een substraat van SiO_2, *a*) bij 200 °C en voor $\Theta = 75°$, *b*) bij 150 °C en voor $\Theta = 0°$, waar Θ de invalshoek van de opdampbundel is.

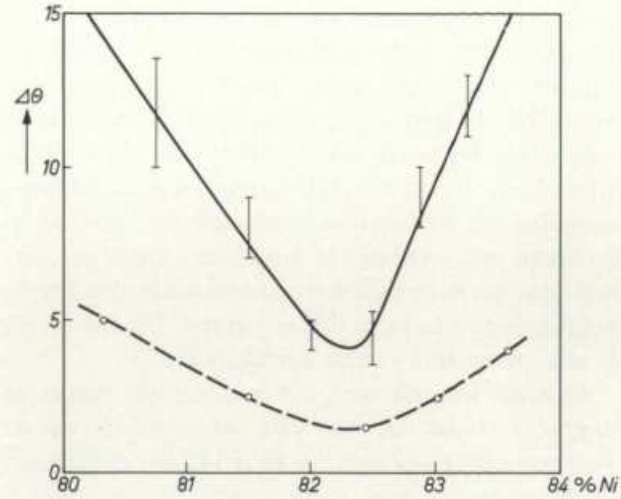


Fig. 8. De deviatie $\Delta\Theta$ uitgezet tegen het percentage Ni in het element. Getrokken curve: glassubstraat met een dikte van 0,125 mm. Gestreepte lijn: aluminiumsubstraat met een dikte van 6 mm. De onzekerheid in de gemeten waarden is weergegeven door verticale lijnen. We zien dat het minimum van $\Delta\Theta$ tussen 82 en 83 % Ni ligt.

keursrichting van de elementen beïnvloedt, hangt af van de magnetostrictieconstante van de gebruikte legering [9]. Het belangrijkste effect is dat er een extra-anisotropie wordt geïnduceerd in het vlak van het element loodrecht op de invallende dampbundel. In ons laboratorium is door een zorgvuldige studie van de structuur van dergelijke elementen aangetoond dat er in de elementen een neiging is tot „korrel"-vorming loodrecht op de invalsrichting [10] (*fig. 7*).

Door deze extra-anisotropie verandert zowel de grootte als, wat belangrijker is, de richting van het gemiddelde anisotropieveld in een element. In *fig. 8* zijn, voor twee verschillende substraatmaterialen, als functie van de samenstelling gegeven de deviatie in de hoekpunten van een vierkant met zijden van 5 cm waarvan het middelpunt zich op de as bevindt; de opdampbron stond op 25 cm afstand.

Invloed van spreiding in de richting van de anisotropie-as

Zelfs voor een groot element zonder deviatie (en met een zwak ontmagnetiserend veld in de voorkeursrichting) zou een van nul verschillend cijferveld nodig zijn om er zeker van te zijn dat een groot deel (b.v. 80 %) van de magnetisatie naar de gewenste voorkeursrichting zou draaien als het woordveld zou worden verwijderd. Dit vindt zijn oorzaak in het feit dat de spreiding die de richting van de eenassige anisotropie in een element vertoont, door het cijferveld moet worden overwonnen.

In *fig. 9* is de grootte van deze spreiding weergegeven als functie van de samenstelling van Ni-Fe-lagen. We

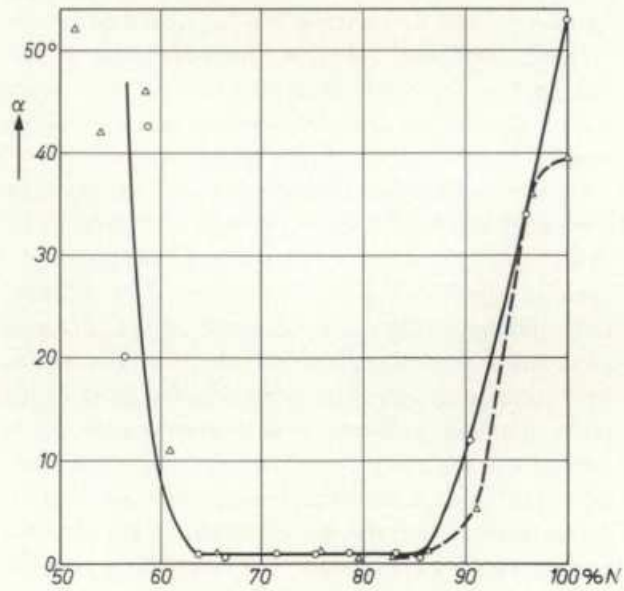


Fig. 9. De spreiding α van de voorkeursrichting uitgezet tegen het percentage Ni in het element. Metingen aan een element met een laagdikte van 100 nm zijn aangeduid met cirkels, metingen bij een dikte van 55 nm met driehoeken.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

zien dat deze spreiding in een gebied van 65 tot 85 % Ni kleiner is dan 1°. Het is bekend dat de exacte waarde van deze parameter verband houdt met de omstandigheden bij het opdampen en met de structuur die de laag in het begin van het opdampproces op het substraat heeft [11]. Er zijn aanwijzingen dat de richtingsspreiding bij lage opdampsnelheden (≈ 1,5-5,0 nm/s) toeneemt met toenemende substraattemperatuur, terwijl deze spreiding bij hogere opdampsnelheden betrekkelijk constant is, maar dan wèl groter. Deze spreiding is ook afhankelijk van de korrelgrootte [12].

Ondanks het vele werk dat er is verricht, bestaat er nog geen model dat voor elke samenstelling van de laag een goede beschrijving geeft van het gedrag van de geheugenelementen. Voor extreme samenstellingen van de laag is het „random uniaxial"-model vrij bevredigend, maar in het gebied dat voor het ontwerpen van een geheugen het belangrijkst is, schijnt het „ripple"-model het best te voldoen [13].

De richtingsspreiding in een element kan dus in het algemeen met louter empirisch afgeleide methodes zeer goed worden voorspeld en in de hand gehouden; ze is echter niet geheel verklaarbaar.

De bovengrens van het cijferveld

In normale dunnelaaggeheugens van het woordtype komen de niet-geselecteerde elementen van het geheugen ook onder invloed van de cijfervelden. Het is duidelijk dat deze velden dus niet groter mogen zijn dan de coërcitie van de elementen in de voorkeursrichting, aangezien anders de niet-geselecteerde informatie kan worden verstoord. Deze verstoringsdrempel blijkt afhankelijk te zijn zowel van de afmetingen van het element als van de coërcitie van het materiaal. In een volgende paragraaf zullen we bespreken hoe de verstoringsdrempel wordt beïnvloed door de afmetingen van het element die door de ontwerper gekozen kunnen worden.

In de praktijk staan de elementen van een geheugen, terwijl het cijferveld aanwezig is, ook nog onder de invloed van stoorvelden in de vorm van zwakke impulsvormige spreidingsvelden in de moeilijke richting. Deze spreidingsvelden worden veroorzaakt door kleine lekstromen in niet-geselecteerde draden, door velden van naburige geselecteerde woorddraden en door het veld van naburige elementen die worden gelezen. Het is bekend dat een zwak impulsvormig veld in de moeilijke richting de drempel aanzienlijk verlaagt, waarbij de magnetisatie (en dus de informatie in het element) kan worden verstoord door een cijferstroom [14]. Als de magnetisatie op deze wijze wordt verstoord, gebeurt dit doordat de grenzen van de Weiss-gebiedjes in een reeks van opvolgende stappen verschuiven. Dit verschijnsel, dat in ons laboratorium en in andere laboratoria is onderzocht, staat bekend onder de naam kruip [15].

De omstandigheden waarbij kruip optreedt, kunnen voor elk type element nauwkeurig worden bepaald, zodat bij het ontwerpen van een geheugen de kruip geen probleem behoeft te zijn. Een goede werking van het geheugen kan vrij eenvoudig worden verkregen indien men ervoor zorgt dat de elementen zich in het geheugen niet te dicht bij elkaar bevinden, zodat de spreidingsvelden van naburige woorden zo klein mogelijk zijn, en indien men er verder voor zorgt dat de woordketens zo zijn ontworpen dat de lekstromen door niet-geselecteerde draden zo zwak mogelijk zijn. In de volgende twee hoofdstukken zal de invloed worden besproken van de afmetingen en de vorm van de elementen op zowel de gewone verstoringsdrempel als op de kruipdrempel; bovendien zal iets worden verteld van de invloed van de laagdikte.

Invloed van de afmetingen van het element op de verstorings- en de kruipdrempel

Bij een gegeven coërcitie geldt dat het uitwendige veld dat nodig is om de magnetisatie te verstoren, kleiner is naarmate het ontmagnetiserende veld in de voorkeursrichting groter is. *Fig. 10* toont voor enige elementen met verschillende breedte de gemeten verstoringsdrempel H_c als functie van de lengte van het element in de voorkeursrichting. De experimenteel gevonden waarden zijn aangeduid met stippen en de berekende waarden met omringde stippen. De berekende waarden werden verkregen door, aannemende dat de elementen ellipsvormig waren, het ontmagnetiserende veld in de voorkeursrichting af te trekken van de in-

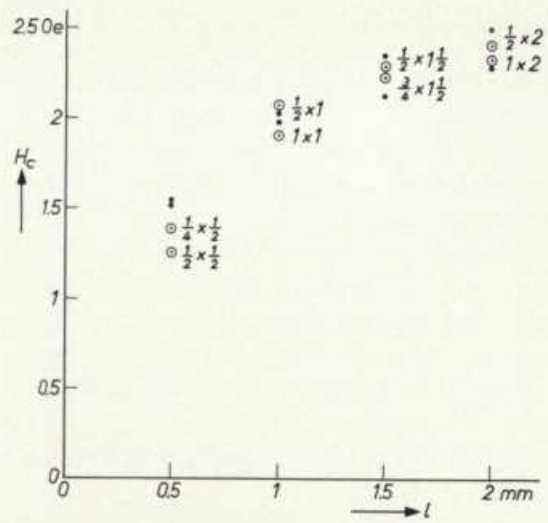


Fig. 10. De hoogte van de verstoringsdrempel H_c als functie van de lengte van de elementen in de voorkeursrichting. De gemeten waarden zijn aangeduid met stippen en de berekende waarden met omringde stippen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

trinsieke coërcitie van het element (in dit geval 2,6 Oe). Coren [16] heeft eveneens een goede overeenstemming gevonden.

Beschouwen we nu de kruipdrempel, dan krijgen we een ander resultaat. We behandelen hier het verband tussen de kruipdrempel en de afmetingen van het element, en wel indien, juist zoals bij een werkelijk geheugen gebeurt, een impulsvormig veld in de moeilijke richting wordt veroorzaakt door stromen ter grootte van de woordstroom die door naburige woorddraden lopen. We nemen hierbij aan dat de afstand tussen de elementen in de moeilijke richting gelijk is aan de breedte van een element in de moeilijke richting.

In *fig. 11* is de gemiddelde waarde van de kruipdrempel H_p uitgezet als functie van de lengte van de elementen in de voorkeursrichting, voor verschillende breedten van het element. Een vergelijking met fig. 10 leert dat deze drempel voor smalle elementen (dus kort in de moeilijke richting) veel kleiner is dan de verstoringsdrempel H_c, maar voor de breedste elementen die worden gebruikt, is H_p even groot als H_c.

Dit resultaat kan eenvoudig worden verklaard. De waarde van de kruipdrempel die in een bepaald geval wordt gevonden, is gelijk aan de verstoringsdrempel verminderd met een getal dat afhangt van het stoorveld in de moeilijke richting. Voor smalle elementen is het veld van de aangrenzende woorddraad om twee redenen sterker. Ten eerste is bij kleine elementen een sterker woordveld nodig. Ten tweede hebben we wel de afstand tussen de elementen in de moeilijke richting gelijk genomen aan de breedte van het element, maar de afstand tussen de woorddraad en het oppervlak van het element is constant gebleven. Voor smalle elementen is daardoor het veld dat de woordstroom in een aangrenzend element opwekt, sterker.

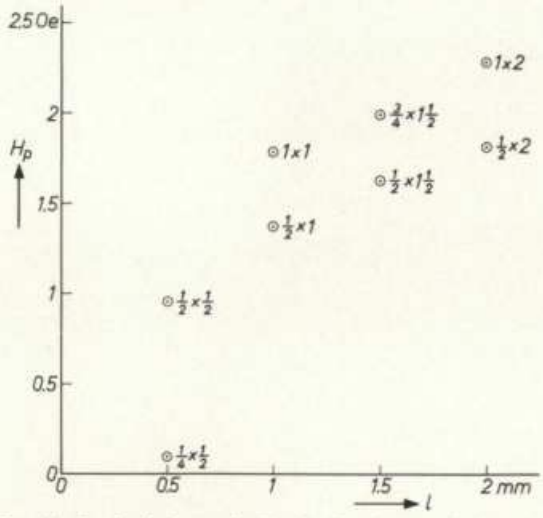


Fig. 11. De kruipdrempel H_p als functie van de lengte van de elementen. We zien dat de kruipdrempel hoger is bij grotere elementen. Vergelijking met fig. 10 leert dat deze drempel voor smalle elementen lager is dan de verstoringsdrempel, maar bij de breedste elementen die worden toegepast, ongeveer even hoog.

Het spreekt vanzelf dat verschillende dimensioneringen verschillende resultaten opleveren, maar we zien uit het bovenstaande toch wel dat het ontwerpen van geheugens met smalle elementen moeilijker is dan met brede. De ontwerper wordt weer geconfronteerd met de keuze tussen enerzijds een cijferstroom die binnen nauwe grenzen moet liggen en anderzijds grote afmetingen van het geheugen en lange looptijden.

De grenzen van de cijferstroom

Zoals hierboven al is vermeld, moet de schakeling die de cijferstroom levert, zo zijn ontworpen dat deze stroom sterk genoeg is om zelfs in het slechtste element informatie te schrijven, maar toch ook niet zo sterk dat in het element met de laagste verstoringsdrempel de informatie wordt verstoord. Hoe kleiner de afstand tussen deze twee grenzen is, des te moeilijker is het ontwerpen van deze schakeling en des te duurder is het apparaat dat hieruit voortkomt. De afstand tussen deze grenzen is bepalend voor de meeste compromissen die moeten worden gesloten.

Zo zal de ontwerper b.v. graag om economische redenen grote matrices in één bewerking willen opdampen. Bij een gegeven afmeting van de elementen hebben bij een grotere matrix de elementen in de hoeken echter een grotere deviatie en is de minimaal bruikbare cijferstroom sterker, zodat de grenzen van de cijferstroom weer dichter bij elkaar komen. De ontwerper zou ook graag de lengte van de elementen in de voorkeursrichting willen verkleinen, om zodoende meer elementen op een oppervlakte-eenheid te kunnen plaatsen, maar bij een gegeven laagdikte zou ook dit de grenzen dichter bij elkaar brengen.

Het is duidelijk dat de ontwerper op dit gebied compromissen moet sluiten. Daarvoor zijn echter kwantitatieve gegevens nodig; we zullen daarom nu bespreken hoe de grenzen waarbinnen de cijferstroom moet blijven, afhangen van de afmetingen van de elementen en van de deviatie.

Invloed van de afmetingen der elementen en van de deviatie

Indien we de grenzen van de cijferstroom willen uitdrukken in een kwaliteitsfactor Q, dan is het logisch

[11] K. D. Leaver, Nature **196**, 158, 1962.
[12] H. Hoffman, Z. angew. Physik **18**, 499, 1965.
[13] J. A. Cundall en A. P. King, M.R.L. Report no. 565, dec. 1965.
[14] T. H. Beeforth, M.R.L. Report no. 504, jan. 1964.
S. Middelhoek, I.B.M. Research RC846, dec. 1962.
P. J. Hulyer, M.R.L. Report no. 505, april 1964.
[15] T. H. Beeforth en P. J. Hulyer, Nature **199**, 793, 1963.
[16] R. L. Coren, Proc. Intermag. Conf. 1965.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

deze te definiëren als het verschil tussen de maximaal toelaatbare en de minimaal vereiste waarde, maar niet in absolute maat, doch in verhouding tot de gemiddelde stroomsterkte. Dus:

$$Q = \frac{\text{max. toelaatb. stroom} - \text{min. nodige stroom}}{\text{gemiddelde stroom}}.$$

Nu kan worden onderzocht wat de invloed op Q is van de vorm van de elementen en van de deviatie.

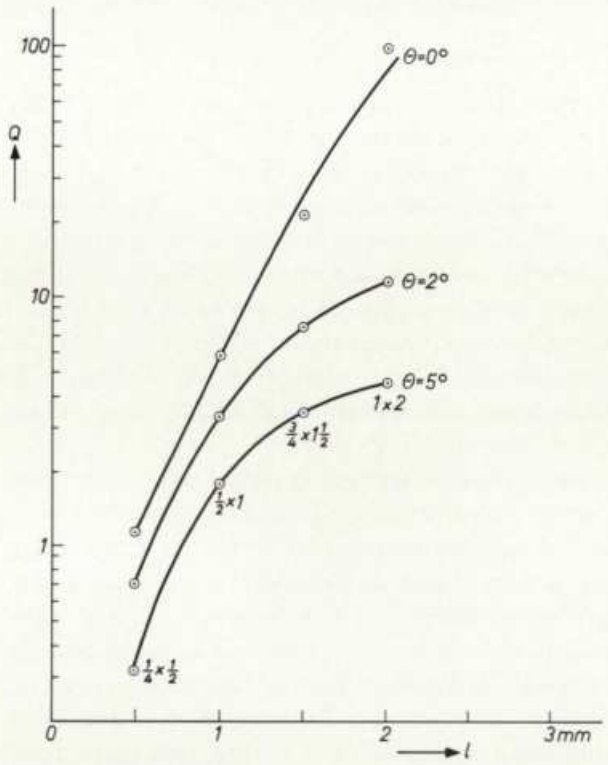


Fig. 12. De kwaliteitsfactor Q als functie van de lengte l van de elementen in de voorkeursrichting, voor verschillende afwijkingen Θ. We zien dat Q snel toeneemt als de elementen groter worden.

Dergelijke onderzoekingen zijn uitgevoerd [3] — hierbij werd meer de verstorings- dan de kruipdrempel betrokken — en de resultaten zijn gegeven in *fig. 12*. We zien dat, zoals te verwachten was, bij een grote lengte in de voorkeursrichting Q snel toeneemt, wat dus ruimere grenzen toelaat voor de schakeling. Dit effect is echter minder duidelijk bij elementen met een grote deviatie.

Gegevens van het soort als hier is beschreven, stellen de ontwerper in staat om het meest geschikte compromis te bepalen tussen b.v. de begrenzingen van de schakelingen, de afmetingen van de elementen, de grootte van de matrices en de vertraging van de signalen in het geheugen. Dit is echter niet eenvoudig en het is niet mogelijk een ontwerp te maken dat voor alle toepassingen optimaal is. De ontwikkeling van de geheugens zal dan ook moeten plaatsvinden door geleidelijke verbetering van het ontwerp, steunend op experimenteel onderzoek.

Hierboven hebben wij geprobeerd enkele relaties te schetsen die deze ontwikkeling mogelijk maken.

Samenvatting. In dit artikel wordt getoond hoe het ontwerpen van magnetische dunnelaaggeheugens wordt beïnvloed door verscheidene parameters van de geheugenelementen. Een aantal factoren wordt behandeld; we noemen hier de invloed van de afmetingen en de vorm van de geheugenelementen op de grootte van de cijferstroom, op de grenzen waartussen deze stroom moet liggen, op het uitgangssignaal, op de minimaal vereiste woordstroom en op het aantal elementen per oppervlakte-eenheid.

Het vaststellen van de geschiktste waarde vereist voor de meeste parameters van de geheugenelementen gecompliceerde compromissen. Men komt tot de slotsom dat het op het ogenblik zeer moeilijk is om tot een ontwerp te komen dat voor de meeste toepassingen optimaal is. Voorts zal de ontwikkeling van deze geheugens moeten plaatsvinden door geleidelijke verbetering van het ontwerp, steunend op experimenteel onderzoek.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Automatisch lezen van geschreven of gedrukte tekens

P. Saraga, J. A. Weaver en D. J. Woollons

In de laatste twintig jaar is in toenemende mate gebleken dat de digitale rekenmachine in staat is tot veel geraffineerdere bewerkingen dan de simpele rekenkundige berekeningen die op de eerste machines werden uitgevoerd. Ook is gebleken dat in vele gevallen de toepassingsmogelijkheid van de rekenmachine wordt beperkt door de beschikbare communicatiemiddelen tussen mens en machine. Dit geldt in het bijzonder voor sommige problemen bij de informatieverwerking, met name die waarbij de hoeveelheden in- en uitgaande informatie groot zijn, maar waarbij betrekkelijk eenvoudige bewerkingen in het centrale orgaan worden uitgevoerd. Bij veel van zulke problemen zou het een aanzienlijke stap voorwaarts betekenen als de machine gedrukte of geschreven alfa-numerieke tekens, dat zijn letters en cijfers, direct zou kunnen lezen.

Bij het probleem van automatisch lezen kan men twee gevallen onderscheiden. Het eerste betreft het lezen van gecontroleerd geproduceerde informatie, d.w.z. dat de organisatie die de leesmachine gebruikt, de produktie van de te lezen tekens in de hand heeft. In dit geval kunnen de tekens worden afgedrukt in een van de speciaal voor optisch lezen ontworpen lettertypen. De twee lettertypen die thans het meest ingang hebben gevonden, staan bekend onder de namen O.C.R.A. en O.C.R.B. [1]. Hiervan is het eerste het door de American Standards Association voorgestelde standaardtype en het tweede het Europese equivalent.

Het tweede geval heeft betrekking op het lezen van tekens die afkomstig zijn van een oncontroleerbare bron. Het meest sprekende voorbeeld hiervan is misschien wel het automatisch sorteren van post, waarvoor het grote publiek de te lezen teksten levert. Dit probleem is veel moeilijker op te lossen dan het eerste, en hiervoor zal onvermijdelijk een duurdere leesmachine nodig zijn.

Onderzoek in het Mullard researchlaboratorium

Met betrekking tot het automatisch lezen met optische systemen is in het Mullard-laboratorium tot dusver alleen het probleem van de ongecontroleerd geproduceerde informatie ter hand genomen. Het onderzoek betreft met name het lezen van gedrukte en met de hand getekende tekens.

Het voornaamste probleem bij het opstellen van een leesprocédé is het ongevoelig maken van het procédé voor de verschillende verminkingen en vervormingen die een teken kan ondergaan. Verminkingen kunnen in het algemeen optreden als onderbrekingen in het teken, variaties in grootte, plaats of stand ervan, vlekken, vouwen, te donkere afdrukken van verschillende graad, en algemene achteruitgang in kwaliteit ten gevolge van het hanteren van het document.

De verschillende soorten vervorming hangen voor een deel af van de manier waarop het teken wordt geproduceerd. Getekende letters, bijvoorbeeld, ontstaan uit halen met de pen of met een ander schrijfinstrument, en zijn daardoor minder onderhevig aan onderbrekingen dan getypte letters, welke laatste ontstaan doordat een soort hamertje op het papier slaat.

Het is daarom gewenst om bij de keuze van de leesmethode rekening te houden met de oorsprong der tekens. Zo is b.v. een lijnaftastmethode beter geschikt voor getekend schrift, maar voor typewerk zal wellicht een maskeringssysteem meer succes hebben.

Omdat systemen voor automatisch lezen onvermijdelijk gecompliceerd zijn, zelfs als men ze op beperkte schaal toepast, is het economischer de eigenschappen van zulke systemen te onderzoeken door nabootsing (simuleren) met een rekenmachine dan door het construeren van speciale machines. Simulatiemethodes hebben verder het voordeel dat het hoofdonderzoek, nl. dat van de eigenschappen van leesprocessen, niet wordt gestoord door technologische moeilijkheden die de realisering in de weg kunnen staan. Deze problemen mogen echter niet genegeerd worden, speciaal dan niet wanneer een praktische leesmachine het einddoel van het onderzoek is.

Apparaat voor directe aansluiting op de rekenmachine

Om op een digitale rekenmachine een leesproces te simuleren, moet men een methode bedenken om het te lezen teken in een voor de rekenmachine geschikte vorm te brengen. Gewoonlijk doet men dit door het teken voor te stellen als een matrix van punten. Elk punt van de matrix heeft een waarde die bepaald wordt door de zwartheid van de matrix in dat punt. Het aantal niveaus van zwartheid kan men zo groot maken als men wil, maar een groter aantal niveaus maakt voor de matrix meer ruimte in het geheugen van de rekenmachine nodig. De eenvoudigste methode, die ook de minste

P. Saraga, B.A., J. A. Weaver, B.A., en D. J. Woollons, Ph.D., medewerkers van Mullard Research Laboratories, Redhill (Surrey), Engeland.

[1] Enkele andere typen worden genoemd in W. Nijenhuis en H. van de Weg, Ontwikkelingen op het gebied van elektronische rekenmachines in het laatste decennium, Philips techn. T. **26**, 83-97, 1964/65, en wel op blz. 96.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

geheugenruimte vergt, bestaat uit het gebruik van een binaire matrix, d.w.z. dat men ieder punt of zwart of wit noemt. Deze methode is door ons toegepast.

Er moest dus een apparaat worden gemaakt, waarmee de op papier gedrukte of getekende tekens in een passende matrixvorm kunnen worden omgezet. Dit kan men doen met behulp van een lichtstipaftaster, die het teken aftast en die een ponstoestel voor papierband of kaarten bestuurt. Op deze wijze worden de tekens op band of op kaarten weergegeven, die dan door normale lezers aan de rekenmachine worden toegevoerd.

Dit proces is evenwel zeer tijdrovend. Beter is het, de lichtstipaftaster rechtstreeks met de rekenmachine te verbinden. Dit is in het Mullard-laboratorium gedaan. *Fig. 1a* toont een voorbeeld van de vorm waarin een teken in de rekenmachine wordt vastgelegd. Zoals men in de figuur ziet, bestaat de matrix uit een serie enen en nullen. Deze worden achtereenvolgens in het rekengeheugen gebracht, waarbij ieder matrixpunt één bit van het geheugen bezet. Aan iedere regel van de matrix worden in de rekenmachine twee volledige woorden toegewezen. Is dus de matrix b.v. 60×60 punten groot, en is de lengte van een woord in de rekenmachine 38 bits, dan wordt elke regel van de matrix vastgelegd in de 38 bits van het eerste eraan toegewezen woord en in 22 bits van het tweede woord. De overige 16 bits van het tweede woord worden niet gebruikt. De volledige matrix bezet derhalve 126 woorden van het rekengeheugen.

Leesprocessen zijn grotendeels bewerkingen aan beelden van tekens die, zoals hierboven werd vermeld, zijn vastgelegd in het rekengeheugen. Men moet daarom over middelen beschikken om zulke beelden gemakkelijk uit de rekenmachine te halen en voor de operateur zichtbaar te maken. Op deze wijze kunnen tussenresultaten van het leesproces worden waargenomen, zodat de operateur het verloop kan volgen. Hiertoe wordt het uitgangssignaal van de rechtstreeks aangesloten rekenmachine weergegeven op het scherm van een katodestraalbuis.

Leessystemen

De meeste optische leessystemen kunnen worden verdeeld in drie secties, die we receptor, voorbewerkingstrap en classificatietrap kunnen noemen.

De receptor zet het op het papier staande teken om in een geschikt ingangssignaal van het eerder beschreven type. De voorbewerkingstrap dient om de informatie in het uitgangssignaal van de receptor die bruikbaar is voor classificatie, te comprimeren en selecteren. Het uitgangssignaal van de voorbewerkingstrap is een bewerkt patroon, dat het ingangssignaal voor de classificatietrap vormt. Deze laatste deelt dan dit patroon in een klasse in.

De receptor

De receptor moet drie functies vervullen: hij moet het in de rekenmachine in te voeren teken opsporen, het drempelniveau instellen (d.i. het niveau bepalen waarboven of waarbeneden een punt wit resp. zwart is) en vervolgens het teken zodanig aftasten dat de vereiste informatie hieruit wordt verkregen.

Het document met de te lezen tekst wordt bevestigd op een onder de aftaster geplaatste trommel. De hoekverdraaiing van de trommel kan worden gestuurd door de rekenmachine. Deze bepaalt de stand van de trommel door het aflezen van een aan één der randen aangebrachte schaalverdeling, die de trommel in 256 sectoren verdeelt.

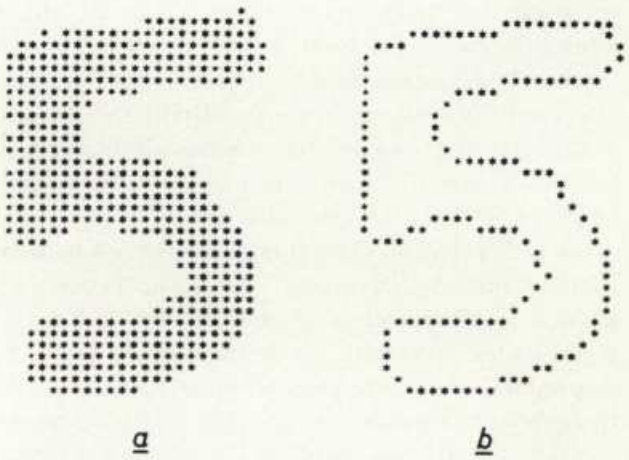


Fig. 1. *a*) Voorbeeld van een teken zoals het in de rekenmachine wordt vastgelegd.
b) De weg van de aftaster langs de rand van het teken.

Voor het verrichten van de drie eerder genoemde functies is een programma opgesteld, en wel voor het speciale geval van één enkele kolom tekens. Momenteel is het niet mogelijk een *regel* tekens af te tasten, maar een wijziging die hierin voorziet, zou, indien nodig, in principe eenvoudig zijn aan te brengen.

De verschillende in het proces gebruikte parameters worden automatisch ingesteld aan de hand van de grootte van het teken dat men het eerst tegenkomt. Bij de aanvang wordt het drempelniveau met de hand ingesteld, zodat men op de katodestraalbuis een duidelijk beeld van het eerste teken krijgt. Dit is alleen nodig als het proces voor de eerste keer begint; het dient dan om het eerste teken op te kunnen sporen. Verder wordt het juiste drempelniveau automatisch telkens opnieuw berekend voor elk teken dat men in het proces tegenkomt. Dit is nodig ter compensatie van variaties die van teken tot teken in het vereiste drempelniveau optreden, en ook ter correctie van mogelijk verloop in de drempelschakelingen.

Na het inschakelen tast het programma het centrale deel van het gezichtsveld van de aftaster af, hierbij bovenaan beginnend, tot het op het eerste teken stuit.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Het volgt dan de rand van het teken, op de hieronder beschreven wijze, en stelt zo de grootte ervan vast. Deze grootte bepaalt de oppervlakte die bij het instellen van het drempelniveau wordt gebruikt, en ook de grofheid van het aftastproces. Ook wordt de beginstand van de trommel genoteerd. Proefondervindelijk is vastgesteld dat het aantal zwarte punten dat een digitale aftaster opspoort, op de in *fig. 2* aangegeven wijze afhangt van de hoogte van het drempelniveau. Verder is experimenteel gevonden dat het optimale drempelniveau, zoals een menselijke operateur dit bepaalt, het niveau is dat correspondeert met het buigpunt in de grafiek.

Op dit punt moeten met de hand het maximum- en het minimumdrempelniveau van de apparatuur worden ingesteld, ten einde overeenstemming te verkrijgen met wat hieromtrent in de rekenmachine is vastgelegd. Dit geschiedt door de geprogrammeerde aftasting op elk van deze twee drempelniveaus te laten geschieden, terwijl de stuurorganen zo worden ingesteld dat zij een bijna geheel witte schermweergave voor de minimumdrempel leveren en een bijna geheel zwarte voor de maximumdrempel.

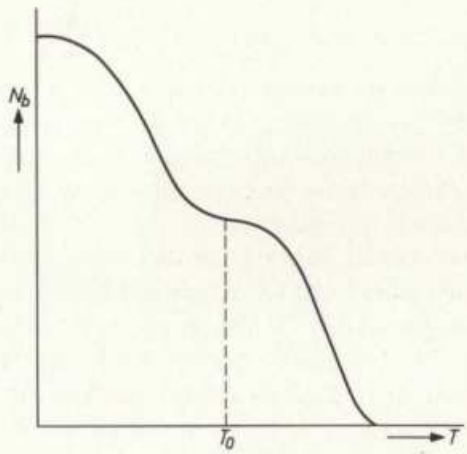


Fig. 2. Het aantal zwarte punten N_b als functie van het ingestelde drempelniveau T. De optimale instelling T_0 van het drempelniveau ligt bij het buigpunt in de grafiek.

Vervolgens wordt begonnen met het automatisch instellen van het drempelniveau; het rekenprogramma kiest hierbij het te gebruiken niveau door het buigpunt in de grafiek te bepalen, na een aantal opeenvolgende rasteraftastingen te hebben uitgevoerd van de oppervlakte van het desbetreffende teken (één aftasting voor elk beschikbaar drempelniveau), en na het aantal zwarte punten te hebben bepaald dat met iedere drempel correspondeert.

Zijn de zojuist beschreven instelprocessen voltooid, dan geschiedt de bewerking verder geheel automatisch. Het programma tast weer af, van boven naar beneden, ontmoet opnieuw het eerste teken, en, daar het drempelniveau en dientengevolge de omvang van het teken veranderd kunnen zijn, worden opnieuw omvang en plaats van het teken bepaald. Het controleert daarna of het drempelniveau juist is; is dit zo, dan zet het de hierna te beschrijven voorbewerking in gang. Behoeft het drempelniveau verandering, dan wordt die tot stand gebracht voordat met de voorbewerking wordt begonnen. Met de voorbewerking wordt alleen begonnen als de plaats van het teken zodanig is dat er een redelijke kans bestaat dat het geheel binnen het gezichtsveld ligt; hierbij wordt rekening gehouden met de aan het begin vastgestelde grootte van het onderzochte teken.

Als de voorbewerking voltooid is, begint het aftasten opnieuw, precies onder het laatste teken. Er wordt dan een gebied doorzocht dat tweemaal zo breed is als het laatste teken en dat er recht onder ligt. Wordt hierbij weer een teken gevonden, dan wordt het bovenstaande proces herhaald. Wanneer echter het teken te dicht bij de onderkant van het gezichtsveld ligt, of als de onderkant van het gezichtsveld zo dicht wordt genaderd dat er onvoldoende ruimte is voor een teken, dan wordt de trommel waarop het papier is bevestigd zoveel gedraaid dat het punt dat de aftaster bereikt heeft, boven aan het gezichtsveld komt te liggen. Het zoeken gaat dan verder vanaf het desbetreffende punt. De hoekverdraaiingen van de trommel worden vastgelegd en het proces gaat automatisch door tot de trommel een volledige omwenteling heeft gemaakt. Hierna wordt het zoeken gestaakt, waarna het proces desgewenst met nieuwe tekens kan worden hervat.

De voorbewerkingstrap

Het ingangsgegeven voor een leesprocédé, het op papier gedrukte teken, bevat veel informatie die niet essentieel is voor het herkennen ervan. Dergelijke informatie is bijvoorbeeld de plaats en de stand van het teken, de in het veld van het teken aanwezige ruis, en onregelmatigheden in de rand van het teken.

Het doel van de voorbewerkingstrap is het verminderen van de ingangsinformatie tot een hoeveelheid die de classificatietrap kan verwerken. Bij voorkeur zou dit moeten gebeuren door uit de ingevoerde tekens een klein aantal kenmerken te kiezen die ongevoelig zijn voor niet te grote vervormingen van de tekens, maar die wel voldoende zijn om hen in groepen te verdelen. Het onderzoek in het Mullard-laboratorium is gericht op het opstellen van kenmerken van een teken door de richting na te gaan waarin een aftaster beweegt die de rand van het teken volgt. De werkelijke beweging van de aftaster kan hierbij worden gedempt om het effect van kleine onregelmatigheden in de rand te verminderen. Voordat het volgen van de rand wordt beproefd, ondergaat het teken nog een middelingsproces. Ook dit verzwakt kleine onregelmatigheden in de rand.

Dit middelingsproces werkt als volgt. Een vierkantje

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

van negen stippen, zoals geschetst in *fig. 3a*, wordt achtereenvolgens op ieder punt van de matrix geplaatst. Zijn vijf of meer punten binnen dit vierkantje aanwezig, dan wordt het middelpunt van het vierkantje in een nieuwe tekenmatrix geschreven, ongeacht of het oorspronkelijk aanwezig was of niet. Zijn er minder dan vijf punten binnen het vierkantje, dan wordt het middelpunt in de nieuwe tekenmatrix weggelaten. Dit proces kan verscheidene malen worden herhaald. Het proces van het volgen van de rand wordt nu toegepast op de nieuwe tekenmatrix.

Het teken wordt opgespoord en de aftaster (een enkele stip, of liever weer een vierkantje van negen stippen) wordt op de boven beschreven manier op de tekenrand gezet. Hierna begint het volgen van de rand. De aftaster kan hierbij van het punt waar hij zich bevindt naar ieder van de acht omringende punten springen. De sprong geschiedt dus in een van de richtingen die in fig. 3*b* zijn te zien. De richtingen 0, 2, 4, 6 corresponderen hier resp. met de richtingen $+X$, $+Y$, $-X$, $-Y$ van de matrix.

Bij het volgen van de rand wordt gebruik gemaakt van twee richtingen, die we de „permanente" en de „actuele" richting zullen noemen. De permanente richting is die van de laatste geslaagde sprong van de aftaster, en de actuele richting is de richting waarin de aftaster zich op het beschouwde ogenblik tracht te bewegen. Wordt een geslaagde sprong gedaan, dan wordt de richting daarvan als nieuwe permanente richting genomen. Het rekenprogramma berekent dan de richting van de eerste keus bij de volgende sprong. Dit is de richting die verkregen wordt door vanaf de permanente richting 90° tegen de klok in te draaien. Kan de aftaster in deze richting voort, dan wordt de beschreven reeks handelingen herhaald, en de richting wordt geregistreerd in een lijst, ten behoeve van de hierna volgende herkenningsprocessen. Is evenwel het punt waarheen de aftaster zich tracht te begeven niet toegelaten (ligt het b.v. buiten het teken), dan wordt de eerstvolgende keus na de actuele richting gevolgd. Dit is de richting die verkregen wordt door vanaf de actuele richting 45° met de klok mee te draaien. Het programma probeert dan de aftaster deze richting te doen inslaan. Het programma gaat bij mislukking hiermee door, met de klok meedraaiend, tot dat een geslaagde sprong kan worden gedaan.

Dit proces houdt de aftaster juist tegen de rand van het teken, zodat hij deze rand volgt. Het wordt voortgezet tot de tekenrand geheel is gevolgd (fig. 1*b*). De lijst van de richtingen die daarbij achtereenvolgens zijn ingeslagen, wordt gebruikt als ingangssignaal voor het classificatieproces.

Het uitgangssignaal, bestaande uit de lijst van sprongrichtingen, is onafhankelijk van de plaats van het teken in het gezichtsveld. Het is ook ongevoelig voor

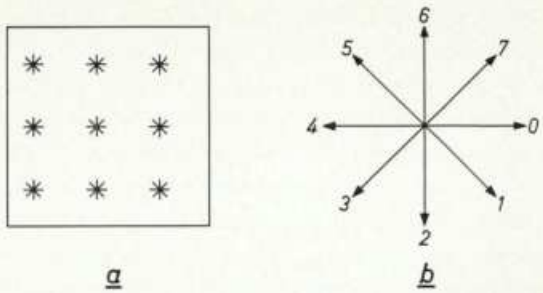


Fig. 3. *a*) Het vierkantje van negen stippen dat bij het middelingsproces de matrix van het teken aftast.
b) De randaftaster kan zich vanuit het punt waar hij zich bevindt, bewegen naar een van de acht omringende punten.

ruis die op het gezichtsveld wordt gesuperponeerd aangezien het grootste teken in het veld wordt uitgekozen.

De classificatietrap

Er zijn twee typen classificatietrappen gesimuleerd. De eerste, die bedoeld is om een gehele alfa-numerieke verzameling tekens (letters en cijfers) te kunnen herkennen, maakt gebruik van het principe van het uitzeven van kenmerken. De tweede, die thans alleen cijfers leest, gebruikt een aanpassingsclassificatiesysteem.

1) Het uitzeven van kenmerken

Bij het classificeren door middel van het uitzeven van kenmerken wordt de richting van de tekenrand geanalyseerd om hieruit een aantal kenmerken te selecteren.

De gekozen kenmerken zijn: einden van lijnen, hoeken, bochten en lussen.

De gemiddelde richting van de tekenrand wordt in ieder punt berekend door een gemiddelde te nemen van de sprongrichtingen die optreden in de omringende punten. Zo'n gemiddelde richting wordt berekend voor ieder punt op de rand. De resulterende lijst van gemiddelde richtingen wordt gebruikt bij het uitzeefproces. Einden van lijnen worden gevonden door in deze laatste lijst te zoeken naar een omkering van de richting die binnen een zeker aantal sprongen optreedt en die voldoende is om het einde te omsluiten. Daar de aftaster de tekenrand volgt met de klok mee, moet de omkering ook met de klok mee geschieden.

Hoeken worden herkend als scherpe veranderingen van de richting van de tekenrand, en bochten als richtingsveranderingen die wel groot zijn maar niet scherp genoeg om als hoek te gelden.

De aanwezigheid van een lus wordt vastgesteld op grond van het feit dat het teken een gesloten binnenrand vertoont binnen een gesloten buitenrand.

Deze kenmerken worden nu gebruikt voor het vaststellen van een codewoord voor het onbekende teken. Dit codewoord wordt vergeleken met een lijst van dergelijke codewoorden van alle elementen van de tekenverzameling die gelezen kunnen worden. Het woord uit

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

de lijst dat precies overeenkomt met dat van het onbekende teken, wordt als identificatie daarvan beschouwd. De mogelijkheid is ook aanwezig om, tezamen met de grafische informatie die aan het systeem wordt toegevoerd, de rekenmachine een aanwijzing te geven omtrent de identiteit van het onbekende teken. Het teken is dan dus voorzien van een „etiket" dat het identificeert. Wordt een teken met een dergelijk „etiket" aan het systeem toegevoerd en wordt geen exacte overeenstemming gevonden tussen zijn codewoord en een der codewoorden uit de lijst, dan zal het nieuwe codewoord als standaardteken in de lijst worden opgenomen met de naam die op het „etiket" voorkomt. Men kan daardoor het proces beginnen met een volkomen lege lijst en deze vullen door tekens met „etiketten" toe te voeren. Dit systeem is nog in ontwikkeling, en resultaten zijn nog niet beschikbaar.

2) Classificatie door middel van aanpassing

Aanpassingssystemen kunnen worden gedefinieerd als systemen die in staat zijn eerder opgedane ervaring te benutten om blijvend optimaal te functioneren. Dit impliceert de een of andere vorm van geheugen om de ervaring vast te leggen, en verbetering van de prestatie kan als een soort leren worden beschouwd.

Aanpassingstechnieken kunnen worden gebruikt om een classificatiesysteem te ontwerpen. De geheugenfunctie bestaat gewoonlijk uit een verzameling vastgelegde instelbare parameters of „gewichtsfactoren".

Het ingangssignaal van de classificatietrap (uitgangssignaal van de voorbewerkingstrap) bestaat uit een nieuw patroon, waarvan de elementen worden verkregen uit metingen aan het patroon dat oorspronkelijk aan de voorbewerkingstrap werd toegevoerd. Elk element van dit nieuwe patroon is een eenvoudig getal. Het patroon van n elementen wordt toegevoerd aan een taxatienetwerk met $n + 1$ instelbare gewichtsfactoren (zg. threshold logic unit, T.L.U.; zie *fig. 4*). Elk element van het patroon wordt getaxeerd door de desbetreffende parameter, en de getaxeerde elementen worden opgeteld, d.w.z. het netwerk geeft een uitgangssignaal $X_1w_1 + X_2w_2 + \ldots + X_nw_n + w_0$ (de extra-gewichtsfactor w_0 heeft een vast ingangselement ter waarde $+1$). Dit uitgangssignaal wordt vergeleken met een drempelwaarde, om een einduitgangssignaal ± 1 te krijgen.

Vooropgesteld dat er een geschikte verzameling gewichtsfactoren kan worden gevonden, kan de T.L.U. een groep patronen scheiden in twee klassen, A en B, zodanig dat de patronen in klasse A een uitgangssignaal $+1$ geven en de patronen in klasse B een uitgangssignaal -1. Men kan de T.L.U. leren de juiste gewichtsfactoren te vinden door een klein aantal patronen van iedere klasse als inleerpatroon te gebruiken. Dit wordt bereikt door ieder inleerpatroon een gewenste uitgangswaarde te geven (fig. 4), die $+1$ is voor alle patronen in klasse A en -1 voor alle patronen in klasse B. Wordt er dus een inleerpatroon aan het systeem toegevoerd, dan is er zowel een werkelijk als een gewenst uitgangssignaal. Hebben deze twee signalen onderling tegengestelde tekens, dan draagt het instructie-orgaan het aanpassingsstuurorgaan op, de gewichtsfactoren op een bepaalde manier te veranderen.

De inleerpatronen worden achtereenvolgens aan de T.L.U. toegevoerd tot ze alle op de juiste wijze geclassificeerd worden. Dit is het geval als het teken van het werkelijke uitgangssignaal positief is voor alle patronen in klasse A en negatief voor alle patronen in klasse B. Er kan dus één enkele T.L.U. worden gebruikt om een groep patronen in twee klassen te verdelen. Om een probleem op te lossen waarbij meer klassen optreden, moet men een combinatie van T.L.U.'s gebruiken.

Om de tien cijfers 0-9 in hun tien klassen te classificeren zijn minimaal vier T.L.U.'s nodig. Deze zouden scheidingen tot stand moeten brengen van het type 01234/56789. Er zijn 126 scheidingen van dit type en meer dan 10 000 mogelijkheden om een bruikbare groep van vier te kiezen. Het gebruik van vier T.L.U.'s

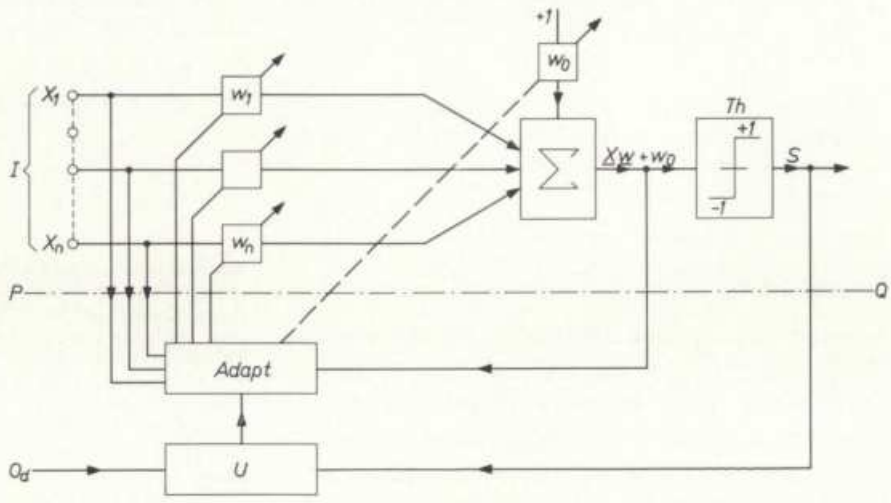


Fig. 4. Het boven de lijn P-Q gelegen drempelnetwerk (zg. threshold logic unit, T.L.U.) berekent het teken van $X_1w_1 + X_2w_2 + \ldots + X_nw_n + w_0$. De ermee verbonden besturingsapparatuur voor het inleren, die zich beneden P-Q bevindt, varieert de gewichtsfactoren $w_0, w_1, \ldots w_n$ tot de juiste scheiding is verkregen. I ingangspatroon. Σ optelorgaan. *Th* drempelorgaan. S teken van $X.w + w_0$. *Adapt* anpassingsstuurorgaan. Q_d gewenst uitgangssignaal. U instructie-orgaan.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

heeft dus het voordeel van het minimumaantal, maar het nadeel dat niet van tevoren bekend is welke scheiding het best aan elke T.L.U. kan worden toegewezen.

Gebruikt men meer dan vier T.L.U.'s, dan wordt het aantal configuraties dat 0-9 kan classificeren, zeer groot. Welke configuratie echter wordt gebruikt, ieder paar klassen moet in een der trappen worden gescheiden. Zo kan b.v. een scheiding als 0/123456789 doeltreffend worden opgebouwd uit de scheidingen van „klasseparen" 0/1, 0/2, 0/3, . . . 0/9.

Om deze reden, en om het inleren eenvoudig te houden, wordt een systeem met 45 T.L.U.'s gebruikt, die ieder klasseparen scheiden (*fig. 5*). Om dus een teken als 3 te herkennen, moeten de scheidingen 0/3, 1/3, 2/3 een negatief uitgangssignaal geven, en 3/4, 3/5, enz., een positief uitgangssignaal.

In het cijferleessysteem dat in het Mullard-laboratorium is ontwikkeld, bevatten de ingangspatronen voor de T.L.U. ieder 25 elementen. Deze worden afgeleid uit de lijst van richtingen van de tekenrand, door middel van een middelingsproces dat het aantal sprongen in de lijst (verschillend voor tekens met verschillende afmetingen) reduceert tot 25 gemiddelde sprongen.

Het inleermateriaal bestond uit 400 cijfers, die door acht mensen waren getekend. Daarna werden leesproeven gedaan met een ander stel van 400 cijfers van de hand van dezelfde mensen, en met 150 cijfers getekend door drie anderen. De resultaten die het leessysteem hiermee opleverde, zijn vermeld in *tabel I*.

Tabel I. Resultaten van een leessysteem met 45 door aanpassing ingeleerde T.L.U.'s, voor 400 met de hand getekende inleercijfers en voor 400 + 150 testcijfers.

	Aantal tekens	Verkeerd geclassificeerd	Afgewezen	Juist geclassificeerd
Inleergroep (cijfers 0-9, getekend door 8 personen)	400	—	—	100%
Testgroep (cijfers getekend door dezelfde 8 personen)	400	1,25%	2,75%	96%
Testgroep (cijfers getekend door 3 anderen)	150	7,3%	8%	84,7%

Verdere ontwikkeling

Deze resultaten zijn bemoedigend. Als een dergelijke machine voor commerciële doeleinden zou worden gebruikt, zou een controlesysteem nodig zijn om de leesfouten op te sporen. Men zou dit b.v. kunnen doen door in de te lezen cijfers een of meer controletekens op te nemen. De techniek daarvoor is echter bekend.

Hoewel het besproken onderzoek plaatsvond door middel van simuleren met een rekenmachine, wordt momenteel gewerkt aan een praktische verwezenlijking van het systeem. Hierbij wordt gebruik gemaakt van een in de handel zijnd apparaat voor het hanteren van het papier, een speciaal aftastapparaat voor het volgen van de rand van de tekens en een kleine universele rekenmachine, die voor het leesproces geprogrammeerd is.

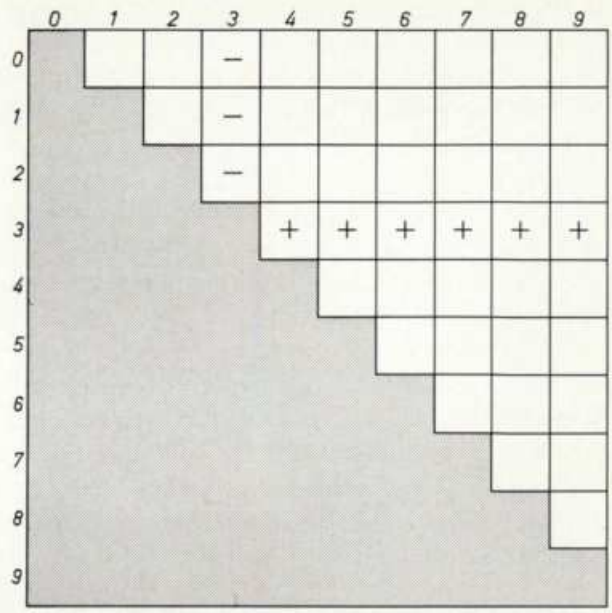


Fig. 5. Decodeersysteem voor het scheiden van klasseparen. Elk vierkant stelt het uitgangssignaal van een van de 45 T.L.U.'s voor. Om een teken als 3 te herkennen, moeten de scheidingen 0/3, 1/3, 2/3 een negatief uitgangssignaal geven en 3/4, 3/5, enz., een positief.

Het toekomstig onderzoek inzake het simuleringsproces is gericht op een zodanige uitbreiding dat ook letters kunnen worden gelezen, en op het voltooien van het systeem gebaseerd op het uitzeven van kenmerken.

De auteurs danken het Britse Ministry of Technology voor de toestemming tot publikatie van dit onderzoek, dat is uitgevoerd met een subsidie van het Advanced Computer Techniques Project van genoemd ministerie.

Samenvatting. Twee systemen voor automatisch lezen van geschreven of gedrukte tekens zijn gesimuleerd op een digitale rekenmachine. Bij beide systemen wordt een teken waargenomen door een rechtstreeks ingeschakelde lichtstipaftaster, die het teken aan de rekenmachine toevoert in de vorm van een binaire matrix. Het automatisch opsporen van het teken en het instellen van het drempelniveau voor de lichtstipaftaster worden beschreven. De richtingen die de aftaster moet inslaan om de buitenrand van het teken te volgen, worden vastgelegd en aangewend voor een nieuw beeld van het teken. Dit beeld wordt in beide leessystemen gebruikt. Het ene systeem spoort bepaalde kenmerken van de rand op, zoals einden en hoeken, het andere maakt gebruik van een samenvattende beschrijving van de rand ten behoeve van een classificatietrap die door aanpassen is ingeleerd. De werking van beide systemen kan worden gevolgd door rechtstreekse weergave op een katodestraalbuis.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Een apparatuur voor het automatisch lezen

De foto toont een deel van de speciale randapparatuur die is ontwikkeld om met behulp van een elektronische rekenmachine de verschillende processen na te bootsen die zich afspelen bij het identificeren van op papier geschreven of gedrukte lettertekens. (Zie het artikel van Saraga, Weaver en Woollons in dit nummer, blz. 297.) Links op de foto ziet men een digitale lichtstipaftaster met katodestraalbuis, die zo bestuurd kan worden dat het te lezen document op vele verschillende manieren wordt afgetast. Op het scherm van de katodestraalbuis rechts hiervan verschijnt dan het resultaat van de aftasting, zoals op de foto is te zien, of eventueel iets geheel anders, dat de rekenmachine hieruit heeft afgeleid. Verschillende aspecten van het automatisch lezen zijn met deze apparatuur onderzocht, zoals b.v. verschillende methodes om plaats en stand van een te lezen teken vast te stellen en om het optimale drempelniveau te kiezen dat voor het aftasten van het teken bij het eigenlijke leesproces dient te worden gebruikt. Het afwerken van het programma van de rekenmachine kan worden geregeld met behulp van het stel drukknopschakelaars waar de experimentator zijn linker hand op houdt [*].

[*] Hoewel deze apparatuur speciaal ontwikkeld werd voor het onderzoek over het automatisch lezen, blijkt nu dat er ook voor allerlei andere doeleinden een nuttig gebruik van kan worden gemaakt. Het gedeelte voor het zichtbaar maken van wat gelezen is (de „lichtschrijver"), is met succes toegepast voor het ontwerp van filters voor telecommunicatie-apparatuur. Ook kunnen elektronenbanen in een potentiaalveld met deze opstelling veel sneller zichtbaar worden weergegeven dan volgens andere methodes, en hiervan is met vrucht gebruik gemaakt voor het ontwerpen van sommige elektronenbuizen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Parametrische versterkers met laag ruisniveau

C. S. Aitchison

Hoewel reeds meer dan een eeuw geleden pogingen zijn gedaan om versterkers te maken die gebaseerd zijn op het gebruik van negatieve weerstanden, is dit onderwerp verder onaangeroerd gebleven tot het eind van de jaren '50. In die tijd kwamen halfgeleiderelementen met *P-N*-overgangen beschikbaar, alsmede ferrieten die geschikt waren voor gebruik in de microgolftechniek. Hierdoor werd het mogelijk om bruikbare negatieve-weerstandsversterkers voor frequenties in het microgolfgebied te maken[1].

Gevoeligheid van ontvangsystemen

Aangezien alle ruisarme versterkers gebruikt worden in de een of andere soort ontvanger, is het gewenst eerst het eenvoudige ontvangsysteem te beschouwen dat geschetst is in *fig. 1*. Het bestaat uit een antenne,

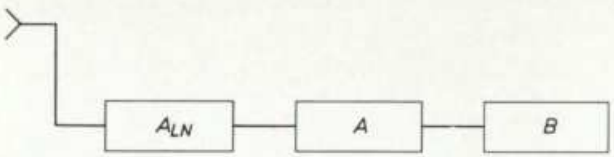


Fig. 1. Ruisarm ontvangsysteem, bestaande uit een antenne, een ruisarme versterker A_{LN} met een grote versterking, en een tweede versterker A met een voldoend grote versterking om een weergeefapparatuur B te kunnen uitsturen.

een ruisarme versterker die een grote versterking levert, en een tweede versterker die een voldoend grote versterking heeft om de weergeefapparatuur uit te kunnen sturen. In een dergelijk systeem ontstaat de ruis die bij de weergave wordt waargenomen, door twee oorzaken, nl. door de ruisarme versterker en door ruisbronnen in de stralingsbundel van de antenne (inclusief de zijlobben van deze bundel).

Deze antenneruis kan worden uitgedrukt in een equivalente ruistemperatuur (T_{ant}). Dit is de werkelijke temperatuur van een weerstand die dezelfde impedantie heeft als de antenne en waardoor de antenne zou kunnen worden vervangen zonder dat de ruiseigenschappen van het systeem veranderen.

In *fig. 2* is de antennetemperatuur uitgezet als functie van de frequentie. (Zijlobben en directe ruisbronnen zijn hierbij verwaarloosd.) Deze figuur toont de ruis die afkomstig is van de melkweg; deze ruis neemt sterk af met toenemende frequentie. Tevens zien wij de bijdragen die waterdamp en zuurstof leveren tot de absorptie. In het frequentiegebied van 2 tot 8 GHz treedt een breed minimum op met een minimale ruistemperatuur van slechts enkele graden Kelvin. Discrete ruisbronnen, zoals de zon en radiosterren, zijn in deze grafiek verwaarloosd, en de exacte hemeltemperatuur is steeds een functie van het onderzochte gebied van de hemel. Deze temperatuur is in het vlak van de melkweg hoger dan loodrecht hierop.

Ook de ruiseigenschappen van de ruisarme versterker worden uitgedrukt in een equivalente ruistemperatuur, T_{amp}. Tussen de signaal-ruisverhouding S/N en de ruistemperaturen bestaat het volgende verband:

$$\frac{S}{N} \sim \frac{1}{T_{ant} + T_{amp}}.$$

Hieruit zien wij dat het voor het verkrijgen van een zo groot mogelijke signaal-ruisverhouding gewenst is dat T_{amp} veel kleiner is dan T_{ant}. Een ruisarme versterker voor microgolven, die gebruikt moet worden bij een ruisarme antenne, moet bij voorkeur geen hogere ruistemperatuur hebben dan 10 °K.

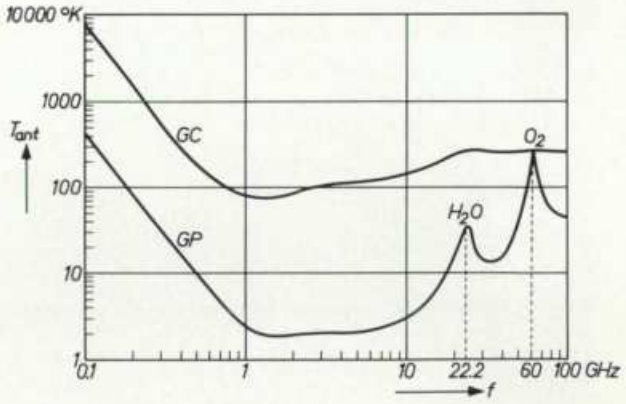


Fig. 2. Ruistemperatuur T_{ant} van een goede antenne als functie van de frequentie f. De kromme GC heeft betrekking op het centrum en de kromme GP op de pool van het melkwegstelsel. In de figuur is ook de absorptie door waterdamp en zuurstof te zien.

De ruiseigenschappen van een ruisarme versterker worden gewoonlijk uitgedrukt in zijn ruisfactor F, omdat deze betrokken wordt op een ruisbron met kamertemperatuur. Tussen de ruistemperatuur T_{amp} van de versterker, uitgedrukt in graden Kelvin, en F bestaat de betrekking:

$$T_{amp} = (F - 1)290.$$

C. S. Aitchison, B.Sc. A.Inst.P., A.R.C.S., medewerker van Mullard Research Laboratories, Redhill (Surrey), Engeland.

[1] B. Bollée en G. de Vries, Experimenten op het gebied van parametrische versterking, Philips techn. T. **21**, 172-176, 1959.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

De parametrische versterker

Inleiding

In *fig. 3* is de principeschakeling van een parametrische versterker weergegeven. Een variabele condensator C met verliesweerstand R_d is aangesloten op twee reactieve ketens; de eerste bestaat uit een spoel met zelfinductie L_s en een circulator waarvan de impedantie gelijk is aan de impedantie R_g van de signaalbron. De circulator voert het signaal van de signaalgenerator naar de versterker en voert tevens het versterkte signaal van de versterker naar de belastingsweerstand R_l. Deze eerste keten is afgestemd op de signaalfrequentie. Een tweede spoel met zelfinductie L_l dient om een tweede keten af te stemmen op een andere frequentie, die men aanduidt als de „idling"-frequentie. Door middel van de bandfilters F_s en F_l worden de signalen met de signaalfrequentie en met de idling-frequentie beperkt tot de desbetreffende ketens.

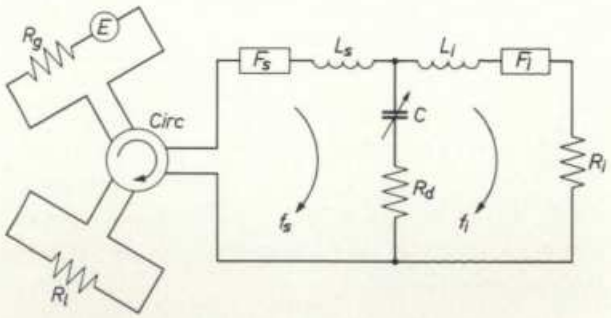


Fig. 3. Principeschema van een parametrische versterker. Een variabele capaciteit C met verliesweerstand R_d is opgenomen in twee reactieve ketens. De eerste, die bestaat uit de spoel L_s en de impedantie R_g van de signaalbron, is afgestemd op de signaalfrequentie f_s. De tweede, met spoel L_l, is afgestemd op de idling-frequentie f_l. R_l vertegenwoordigt de energieverliezen buiten die welke door R_d ontstaan. Door de bandfilters F_s en F_l blijven de signaalstroom en de idling-stroom ieder beperkt tot hun eigen keten. De circulator *Circ* voert het signaal van de signaalbron E naar de versterker, en het versterkte signaal van de versterker naar de belastingsweerstand R_l.

Men kan wiskundig aantonen dat, als de capaciteit C wordt gevarieerd met een frequentie die de som is van de signaalfrequentie en de idling-frequentie, energie wordt overgedragen van de bron die de capaciteit varieert, naar de signaalketen en de idling-keten. De stroom die in deze beide ketens vloeit, neemt toe op dezelfde wijze als wanneer de verliezen verminderd zouden zijn door het inschakelen van een negatieve weerstand. Dit proces staat bekend als „pompen", en de afgifte van pompenergie aan de signaalketen en de idling-keten ontstaat door de periodieke variatie van de capaciteit. Door menging van de signaal- en pompfrequenties ontstaan dan zijbanden.

De stroom in de signaalketen wordt gegeven door:

$$I = \frac{E}{(R_g + R_d)(1 - A)},$$

waarin A de verhouding is van de negatieve weerstand die in de signaalketen wordt geïntroduceerd, tot de hierin aanwezige positieve weerstand. Verder is E de e.m.k. van de signaalbron.

Het verband dat bestaat tussen A en de parameters van de keten, luidt:

$$A = \frac{\gamma^2}{4\pi^2 C^2 f_s f_l (R_g + R_d)(R_l + R_d)},$$

waarin γ een maat is voor de capaciteitsvariatie die bij het pompen optreedt:

$$\gamma = \frac{C_{max} - C_{min}}{2(C_{max} + C_{min})}.$$

R_l vertegenwoordigt de verliezen in de idling-keten voor zover deze niet worden veroorzaakt door de capaciteit C.

We zien dus dat het vervangschema bij de signaalfrequentie wordt gevormd door een serie-resonantiekring, die bestaat uit C en L_s, een verliesweerstand R_d en een extra weerstandscomponent, nl. een negatieve weerstand $A(R_g + R_d)$. Het geheel wordt gevoed uit een signaalbron met impedantie R_g.

De versterking van de paramagnetische versterker

De versterking van de beschreven versterker met een negatieve weerstand en een circulator kan worden geschreven in de volgende vorm:

$$G = |\varrho|^2 = \left\{\frac{R_g + |R_-|}{R_g - |R_-|}\right\}^2.$$

Hierbij is de definitie van de reflexiecoëfficiënt ϱ uitgebreid door aan te nemen dat hierin negatieve weerstanden kunnen voorkomen. Verder is $|R_-|$ de absolute waarde van de negatieve weerstand waarmee de leiding, die een karakteristieke impedantie R_g heeft, is afgesloten.

Wensen we dus een bepaalde versterking en kennen we R_g, dan kunnen we de minimumwaarde van R_d berekenen als we aannemen dat γ maximaal is.

Ruisfactor en bandbreedte van de parametrische versterker

Nu wij uitdrukkingen hebben afgeleid voor de stromen als functies van de e.m.k. van de generator en de capaciteitsvariatie, kunnen wij de ruisfactor van de versterker berekenen, uitgaande van de normale definitie hiervan. In de schakeling zijn drie bronnen van thermische ruis aanwezig: de weerstand van de signaalbron, R_g; de verliezen in de capaciteit, R_d; en de verliezen in de idling-keten, R_l. Verwaarlozen we de verliezen in de circulator en nemen we aan dat bij het pompen geen ruis ontstaat, dan vinden we voor de ruisfac-

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

tor de volgende uitdrukking:

$$F = 1 + \frac{R_d}{R_g}\frac{T}{T_0} + A\frac{f_s}{f_i}\left(\frac{R_d + R_g}{R_g}\right)\frac{T}{T_0}.$$

Hierbij is aangenomen dat R_d en R_i dezelfde temperatuur T hebben. Verder is T_0 de standaardtemperatuur die in de definitie van de ruisfactor wordt gebruikt. Tussen T_{amp} en de ruistemperatuur van de versterker bestaat het verband:

$$T_{amp} = T\left\{\frac{1}{p} + A\frac{f_s}{f_i}\left(1 + \frac{1}{p}\right)\right\},$$

waarin p gelijk is aan de transformatieverhouding R_g/R_d. Als wij ervoor zorgen dat p groot is, kan bij een grote versterking ($A \approx 1$) met goede benadering voor deze uitdrukking worden geschreven:

$$T_{amp} = \frac{f_s}{f_i}T.$$

We kunnen dus de ruistemperatuur van de versterker veel lager maken dan de werkelijke temperatuur, door f_i veel groter te maken dan f_s. Dit is het grote voordeel van parametrische versterking.

Het is nuttig om het verband vast te leggen tussen de transformatieverhouding en de kenmerkende grootheden van de „gepompte" capaciteit, γ, C en R_d. Als we $A = 1$ stellen, luidt de hiervoor geldende uitdrukking:

$$\gamma f_c = \sqrt{f_s f_i (1 + p)},$$

waarin $f_c = 1/(2\pi C R_d)$. Deze laatste grootheid staat bekend als de afsnijfrequentie.

R_g en f_i kunnen, bij constante waarde van $(R_g + R_d)f_i$, zodanig worden gevarieerd dat de versterking niet verandert. Uit de formule voor de ruisfactor volgt nu dat er een optimale waarde van de idling-frequentie bestaat, die correspondeert met een minimale waarde van de ruisfactor. Deze waarde is:

$$F_{min} = 1 + \frac{2f_s}{\gamma f_c}\frac{T}{T_0}.$$

Zij treedt op bij de optimale waarde van de pompfrequentie, γf_c (aangenomen dat γf_c groot is ten opzichte van f_s). De minimale waarde van de ruistemperatuur van de versterker is:

$$T_{amp\ min} = \frac{2f_s T}{\gamma f_c}.$$

We zien dat de temperatuur hier is uitgedrukt als functie van de grootheid γf_c, die kenmerkend is voor de condensator, en verder als functie van de signaalfrequentie en de werkelijke temperatuur. De grootheid γf_c is dus een waarderingsfactor voor de condensator.

De bandbreedte van een parametrische versterker die gebruikt wordt in combinatie met een circulator, kan worden uitgedrukt in de bandbreedten van het „ongepompte" signaal, B_s en van het idling-signaal, B_i. Het verband tussen versterking en bandbreedte is gegeven door:

$$G^{1/2}B = 2\left(\frac{1}{B_s} + \frac{1}{B_i}\right)^{-1}.$$

Deze formule beschrijft hoe de versterking en de bandbreedte afhangen van de passieve parameters van de signaal- en de idling-keten.

De varactordiode

Zoals bekend is, bestaat er een analogie tussen een P-N-overgang in halfgeleidermateriaal en een vlakke condensator. De oorzaak hiervan is het feit dat de via de P-N-overgang optredende diffusie van gaten in het P-materiaal en van elektronen in het N-materiaal resulteert in een bepaalde ladingsdichtheid aan beide zijden van de overgang. De potentiaalgradiënt die hierdoor ontstaat, beperkt het gebied waaruit de ladingdragers verwijderd worden en begrenst de zogenaamde verarmingslaag. De dikte van deze laag kan worden gevarieerd met behulp van de aangelegde spanning, zodat de capaciteit van de verarmingslaag veranderd kan worden.

De capaciteit wordt gegeven door de uitdrukking:

$$C = \frac{C_0}{(1 - V/\Phi)^n},$$

waarin Φ de contactpotentiaal is, V de aangelegde spanning en n een exponent, die 0,5 is voor een abrupte overgang en 0,33 voor een meer geleidelijke overgang.

In *fig. 4* is kwalitatief het verloop weergegeven van de capaciteit en van de stroom met de aangelegde spanning. We zien hieruit dat de capaciteitsvariatie in de doorlaatrichting beperkt is door het optreden van

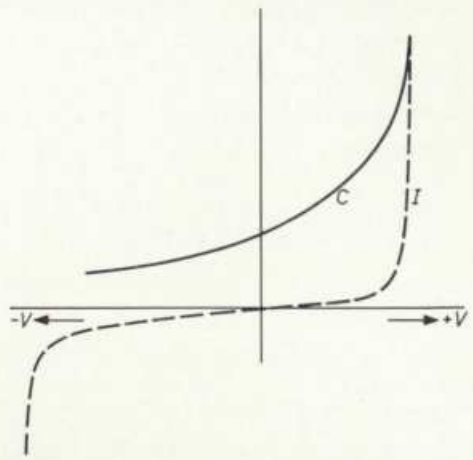


Fig. 4. Variatie van de capaciteit C en de stroom I met de spanning V op een P-N-overgang. De capaciteitsvariatie is in de doorlaatrichting beperkt door de stroom en in de keerrichting door het optreden van doorslag.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

stroom, en in de keerrichting door doorslag. Deze stroom verlaagt de afsnijfrequentie van de varactordiode; het optredende hageleffect doet bovendien ruis ontstaan. De ruiseigenschappen van een versterker met een varactordiode worden dus slechter als de diode overstuurd wordt. Aanvaardbare grenzen zijn 1 V keerspanning en 1 μA doorlaatstroom.

Varactordiodes voor gebruik in versterkers bij kamertemperatuur worden gewoonlijk vervaardigd van silicium of van galliumarsenide. Bij gebruik van galliumarsenide treedt een hogere afsnijfrequentie op; deze blijft vaak behouden als de temperatuur wordt verlaagd tot die van vloeibaar helium. Silicium heeft ten opzichte van galliumarsenide het voordeel van een grotere waarde van γ, maar het nadeel van een lagere afsnijfrequentie. Verder kan silicium alleen worden gebruikt bij temperaturen hoger dan die van vloeibare stikstof.

Fig. 5 toont het vervangschema van een varactordiode die in een speciale houder is geplaatst voor gebruik bij microgolven. Het schema bestaat uit de capaciteit C_j van de overgang, in serie met de weerstand R_{ser}; parallel hiermee bevindt zich de interne spreidingscapaciteit C_{int}. In serie met deze parallelschakeling staat de zelfinductie L van de aansluitdraden; parallel met dit geheel staat verder weer de capaciteit C_{ext} van de houder.

Het is meestal handiger om de combinatie van C_j, R_{ser} en C_{int} te vervangen door een equivalente serieschakeling van een capaciteit C en een weerstand R_d (fig. 5*b*).

De twee houders die voor microgolven veel gebruikt worden, staan bekend als de „pil" en de „micropil". Van beide is in *fig. 6* een schets gegeven.

De Mullard-varactordiode CAY 10 van galliumarsenide wordt gefabriceerd in de pil-uitvoering, terwijl de Mullard-varactordiode van epitactisch galliumarsenide, de CXY 10, in de micropil-uitvoering wordt gemaakt. In *tabel I* zijn de microgolfeigenschappen van deze varactordiodes opgenomen[2].

Tabel I. Microgolfeigenschappen van de Mullard-varactordiodes CAY 10 (galliumarsenide; pil-uitvoering) en CXY 10 (epitactisch galliumarsenide; micropil-uitvoering).

		CAY 10	CXY 10
C bij 0 volt	(pF)	0,4	0,25
R_d bij 0 volt	(Ω)	4	2
Serieresonantiefrequentie	(MHz)	9	35
Zelfinductie van de aansluitdraden	(pH)	700	100
C_{ext}	(pF)	0,15	0,25
Parallelresonantiefrequentie	(GHz)	30	50
γf_c	(GHz)	25	40
f_c	(GHz)	150	300

[2] Deze varactors zijn ontwikkeld door Associated Semiconductor Manufacturers Ltd., Wembley, Engeland — een met ons samenwerkende onderneming.

Het ontwerpen van parametrische versterkers

Als een varactordiode wordt afgestemd door middel van elementen met verdeelde parameters, is Q hoger dan wanneer discrete elementen worden toegepast. De bandbreedte is dus in het eerstgenoemde geval kleiner. Aangezien men het produkt van versterking en bandbreedte niet nodeloos klein wil maken, is het dus gewenst om zowel voor de signaalketen als voor de idling-keten discrete schakelingselementen te gebruiken. Om deze reden kan voor het afstemmen op de idling-frequentie een bijzonder nuttig gebruik worden gemaakt van de inwendige resonantie van de varactordiode, terwijl een spoel gebruikt kan worden om de diode op de signaalfrequentie af te stemmen.

In een van de eerste bij Mullard gemaakte versterkers, „type 2" genaamd, die kan werken bij signaal-

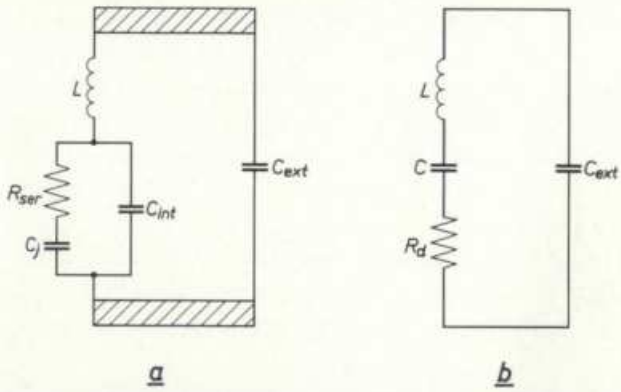


Fig. 5. *a*) Het vervangschema van de *P-N*-overgang van een varactordiode in een speciaal voor microgolven gemaakte houder. C_j capaciteit van de *P-N*-overgang. R_{ser} serieweerstand. C_{int} inwendige spreidingscapaciteit, L zelfinductie van de aansluitdraden. C_{ext} capaciteit van de houder. *b*) R_{ser}, C_j en C_{int} kunnen worden vervangen door C en R_d.

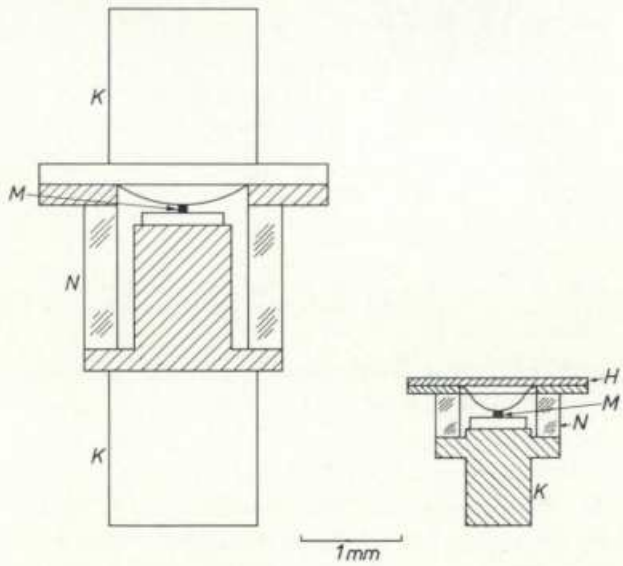


Fig. 6. De twee houders die worden gebruikt voor microgolfvaractordiodes, de „pil" (links) en de „micropil" (rechts). *K* contact van kovar. *M* door diffusie verkregen mesa-*P-N*-overgang. *N* keramische isolator. *H* topaansluiting.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

frequenties tussen 400 en 3000 MHz en die wordt gepompt in het frequentiegebied 7-12 GHz, wordt de diode CAY 10 gebruikt. *Fig. 7* toont deze versterker. Een dubbele coaxiale kwart-golflengtetransformator transformeert de impedantie van 50 Ω van de signaalketen naar een waarde die geschikt is voor de diode. Een kort stukje coaxiale leiding met een grote karakteristieke impedantie komt bij de signaalfrequentie overeen met een discrete spoel; deze is in resonantie met de varactordiode waarmee de genoemde leiding is afgesloten. De stroom met de idling-frequentie vloeit in de door de diode gevormde parallelkring, die bij de betreffende frequentie in resonantie is. De resonantiefrequentie wordt verlaagd tot in het gebied 6-8 GHz door de sonde die in de golfpijp steekt om pompenergie naar de diode te voeren. De afsnijfrequentie van de golfpijp is hoger dan de idling-frequentie, en bij de pompfrequentie is de golfpijp reflexievrij afgesloten door middel van een op een geschikte plaats aangebrachte kortsluiting en enkele schroeven. *Fig. 8* toont een aantal van deze versterkers. In *tabel II* zijn enkele resultaten opgenomen die verkregen zijn met dit type versterker in het frequentiegebied van 400 MHz tot 4,6 GHz.

In *fig. 9* is een andere versterker geschetst, genaamd „type 3" [3]. Deze werkt in het gebied 2,4-12 GHz met een pompfrequentie in het gebied 26-40 GHz. Ook hier is een kwart-golflengtetransformator aangebracht, die de impedantie van 50 Ω transformeert tot een voor de diode geschikte waarde. De tweede helft van deze transformator bevat een laag doorlatend filter waarmee wordt voorkomen dat signalen met de idling-frequentie of met de pompfrequentie in de coaxiale leiding doordringen. De diode is in de golfpijp geplaatst; in serie met de diode bevindt zich een kort stuk coaxiale leiding, dat dienst doet als discrete spoel. Bij gebruik van de pildiode CAY 10 vloeit de idling-stroom (frequentie ca. 30 GHz) in de door de diode gevormde parallelkring. Bij de idling-frequentie is de bovengenoemde coaxiale leiding een kwart golflengte lang. Wordt de micropildiode CXY 10 gebruikt, dan vloeit de idling-stroom in de seriekring die door de diode

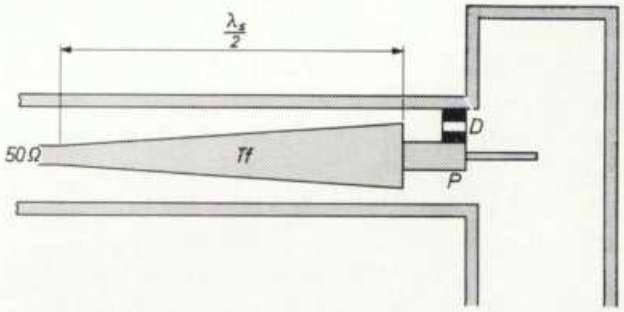


Fig. 7. Schets van een der eerste door Mullard vervaardigde parametrische versterker van het type 2. Hierin wordt de diode CAY 10 gebruikt bij signaalfrequenties in het gebied 400-3000 MHz. Een impedantietransformator *Tf*, bestaande uit een conisch stuk coaxiale leiding ter lengte $\frac{1}{2}\lambda_s$, transformeert bij de signaalfrequentie de weerstand van 50 Ω tot een impedantie die geschikt is voor de diode *D*. Een kort stukje coaxiale leiding *P* doet bij de signaalfrequentie dienst als een discrete zelfinductie en is in resonantie met de varactordiode.

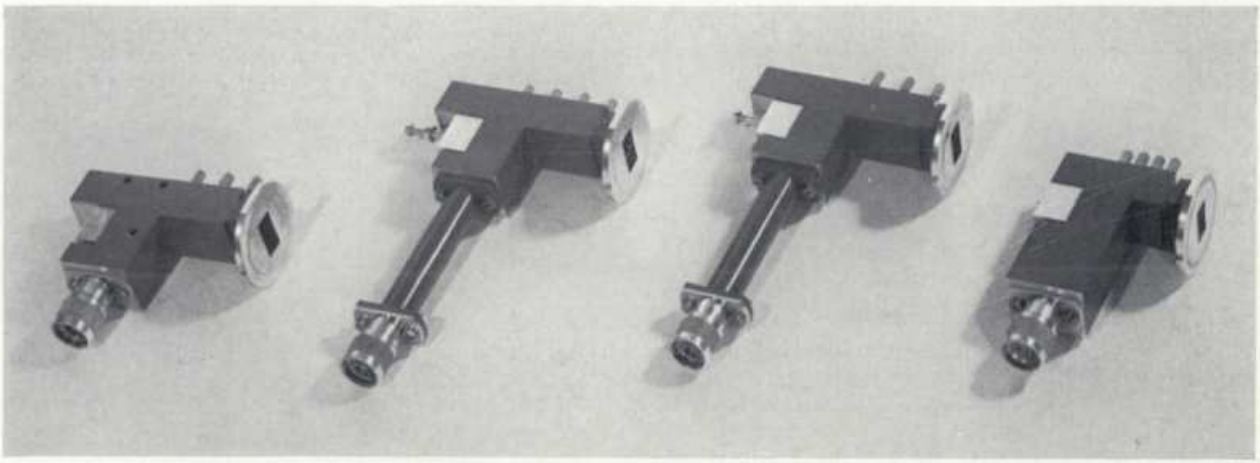


Fig. 8. Een serie versterkers van het type 2 die het frequentiegebied 400-3500 MHz bestrijken. De pluggen van het type N geven een indruk van de grootte.

Tabel II. Samenvatting van de resultaten verkregen met een versterker van het type 2.

Signaalfrequentie MHz	Pompfrequentie GHz	Ruisfactor dB	Bandbreedte MHz	Pompvermogen mW	Afstemgebied MHz
400	7000	1,6	12	1	—
750	7500	1,9	15	1	± 50
1400	8000	2,0	20	1	±100
3000	9500	3,0	20	10	±250
4600	12000	4,5	25	50	—

[3] C. S. Aitchison, R. Davies en P. J. Gibson, A simple diode parametric amplifier design for use at *S*, *C* and *X*-band, IEEE Trans. on microwave theory and techniques **MTT-15**, 22-31, 1967 (no. 1).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

wordt gevormd. De resonantiefrequentie hiervan ligt in de buurt van 30 GHz; de coaxiale leiding is dan bij de idling-frequentie een halve golflengte lang. *Fig. 10* toont drie versterkers van dit type. Zij werken in de frequentiebanden bij 3 GHz, 5,5 GHz en 9 GHz. In *tabel III* zijn enkele resultaten vermeld die met deze versterkers werden verkregen.

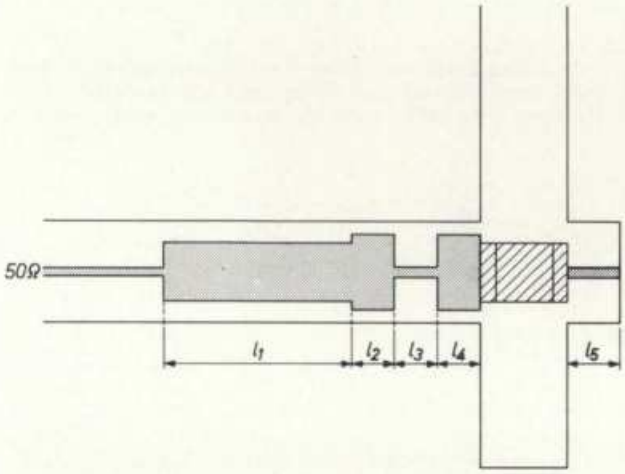


Fig. 9. Schets van een versterker van het type 3, die werkt in het frequentiegebied 2,4-12 GHz met een pompfrequentie in het gebied 30-40 GHz. De coaxiale leidingen met de lengten l_1, l_2, l_3 en l_4 vormen bij de signaalfrequentie een dubbele kwart-golflengtetransformator. De leidingen met lengten l_2, l_3 en l_4 zijn bij de idling-frequentie een kwart golflengte lang. De diode is gearceerd. De sectie ter lengte l_5 dient om de signaalketen af te stemmen en is bij de idling-frequentie een kwart golflengte lang.

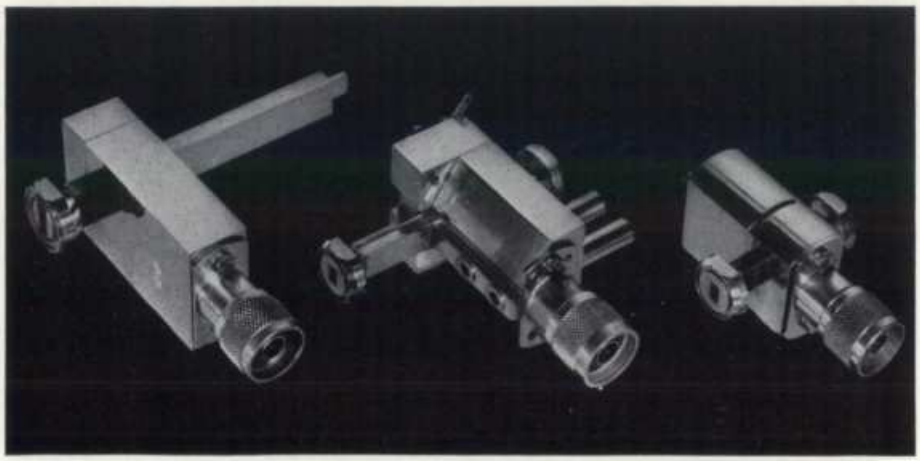


Fig. 10. Drie versterkers van het type 3. Zij werken in de frequentiebanden bij 3 GHz (links), 5,5 GHz (midden) en 9 GHz (rechts).

Tabel III. Samenvatting van de resultaten verkregen met een versterker van het type 3.

Signaal-frequentie GHz	Pomp-frequentie GHz	Ruis-tempe-ratuur °K	3-dB-band-breedte bij 20 dB ver-sterking MHz	Pomp-vermogen mW	Afstem-gebied MHz	Varactor diode type
3,0	33	95	25	20	150	CAY 10
5,6	39	140	50	50	250	CAY 10 geselect.
9,0	33	190	50	20	500	CXY 10

Optimalisering van de bandbreedte

Theorie

Uit theoretische beschouwingen volgt dat voor een parametrische versterker waarbij de signaalketen en de idling-keten uit enkelvoudige kringen bestaan, de maximale bandbreedte bij een gegeven versterking verkregen wordt als de diode in serie-resonantie is bij de idling-frequentie. Het is dan mogelijk om de bandbreedte voor het ongepompte ontvangen signaal en het idling-signaal te berekenen als functie van de transformatieverhouding en de parameters van de diode. Door differentiëren kan men aantonen dat er een waarde voor de idling-frequentie is waarbij het produkt van de wortel uit de versterking en de bandbreedte maximaal is. Deze optimale idling-frequentie is:

$$f_{i\,opt} = \left(\frac{2\gamma^2 f_c^2 f_s}{1 + C_{ext}/C}\right)^{1/3}.$$

De bedoelde maximale waarden van het produkt van de wortel uit de versterking en de bandbreedte bedraagt

$$G^{1/2} B_{max} = \frac{2}{3 f_c}\left(\frac{2\gamma^2 f_c^2 f_s}{1 + C_{ext}/C}\right)^{2/3}.$$

Op deze wijze kunnen we, gebruik makend van de diodeparameters, bij verschillende waarden van de signaalfrequentie de frequentiekarakteristiek berekenen.

Een gunstiger verband tussen bandbreedte en versterking kan worden verkregen door compenserende reactieve elementen in de signaalketen of in de idling-keten op te nemen. Terwijl voor de eenvoudige ongecompenseerde versterker het produkt van versterking en bandbreedte de vorm $G^{1/2}B$ = constant heeft, kan door berekeningen worden aangetoond dat voor enkelvoudige compensatie met een reactantie dit produkt de vorm $G^{1/4}B$ = constant aanneemt; een verdere compensatie leidt tot de vorm $G^{1/6}B$ = constant.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

De optimalisering in de praktijk

De handigste methode om een idling-stroom te onderhouden in de seriekring van de varactordiode, bestaat in het gebruik van twee van deze diodes, waarbij elk hiervan is opgenomen in de op de idling-frequentie afgestemde keten van de andere. Men kan hiertoe twee varactordiodes van het micropiltype op een onderlinge afstand van een halve golflengte aansluiten op een asymmetrische bandleiding (engels: micro-strip). Als de karakteristieke impedantie van deze leiding voldoend klein is, komt de bandbreedte van dit systeem overeen met die van één varactordiode. Wij hebben een parametrische versterker (type 5) gemaakt waarin dit systeem is toegepast. Hierin is de normale coaxiale ingangsketen gebruikt terwijl de idling-keten in de golfpijp is geplaatst. *Fig. 11* toont een dergelijke versterker; bij een signaalfrequentie van 4 GHz en een pompfrequentie van 33 GHz bedroeg hierbij het produkt van de wortel uit de versterking en de bandbreedte 1 GHz.

Door compensatie met een reactantie kon, bij een versterking van 20 dB, de bandbreedte worden vergroot tot 250 MHz. *Fig. 12* toont de frequentiekarakteristiek van een cascadeschakeling van twee dergelijke versterkers; bij een signaalfrequentie van ongeveer 3,8 GHz bedroeg de bandbreedte 500 MHz en de versterking 26 dB.

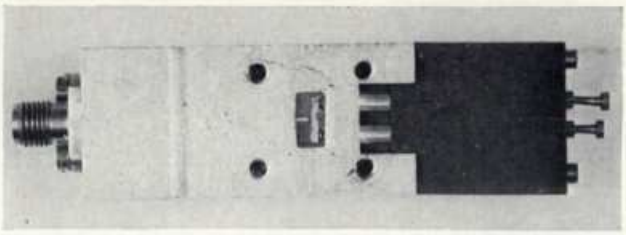


Fig. 11. Versterker van het type 5 met twee micropildiodes. Bij een signaalfrequentie van 4 GHz en een pompfrequentie van 33 GHz wordt hiermee voor het produkt van de wortel uit de versterking en de bandbreedte een waarde van 1 GHz bereikt.

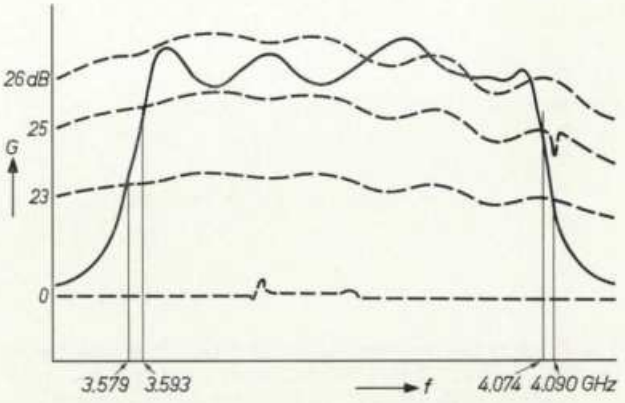


Fig. 12. Frequentiekarakteristiek van een cascadeschakeling van twee parametrische versterkers van het type 5, opgenomen met een penschrijver. De stippellijnen geven de niveaus aan voor 26, 25, 23 en 0 dB; de getrokken lijn is de frequentiekarakteristiek van de twee in cascade geschakelde versterkers.

Verbetering van de ruistemperatuur

Zoals reeds werd vermeld, is de ruistemperatuur van een parametrische versterker evenredig met zijn werkelijke temperatuur. Als we de waarderingsfactor γf_c constant veronderstellen, kan een verlaging van de ruistemperatuur worden verkregen door de versterker te koelen tot temperaturen van b.v. 80 °K (vloeibare stikstof) of 4 °K (vloeibaar helium). Een versterker van het type 5 met een signaalfrequentie van 4 GHz is in dit laboratorium gekoeld tot 4 °K; hierbij werd een ruistemperatuur van 3 °K verkregen.

Toekomstig werk

Door combinatie van methodes voor het verkrijgen van een brede frequentieband en van koeling zullen versterkers worden gemaakt met een ruistemperatuur van minder dan 10 °K, die bij een signaalfrequentie van 4 GHz een bandbreedte van 500 MHz en een versterking van 26 dB hebben. In het Mullard-laboratorium wordt een dergelijke versterker ontwikkeld. Deze zal worden gebruikt als eerste trap in een ontvanger voor communicatie via satellieten.

Koeling tot lage temperaturen is echter slechts een tijdelijke maatregel; verdere verbeteringen in de waarderingsfactor van de varactordiodes zullen ten slotte koeling overbodig maken.

Tegenwoordig is de bouw van parametrische versterkers duur; zij worden daarom alleen gebruikt voor professionele doeleinden. Men is in dit laboratorium begonnen met het vervaardigen van discrete elementen voor microgolven door opdampen. Als resultaat hiervan zullen goedkope parametrische versterkers beschikbaar komen, waarbij goedkope halfgeleiderelementen de bron voor de pompenergie vormen. Deze versterkers zullen dan kunnen worden gebruikt in produkten voor massafabricage.

Samenvatting. Parametrische versterkers zijn ruisarme toestellen die worden gebruikt in ontvangers voor microgolven. De reden voor het gebruik hiervan wordt in dit artikel uiteengezet, terwijl verder theoretische beschouwingen worden gewijd aan de werking van parametrische versterkers met varactordiodes. De kritische diodeparameters worden aangegeven, en er wordt aangetoond dat de versterker zodanig kan worden gemaakt dat een optimale waarde van de ruisfactor of van de bandbreedte wordt verkregen. De ruiseigenschappen kunnen worden verbeterd door koeling van de varactordiode. Er worden algemene richtlijnen voor het ontwerp gegeven, terwijl ook in de praktijk uitgevoerde constructies van een aantal versterkers worden besproken. Deze werken in het frequentiegebied van 400 MHz tot 12 GHz. Ten slotte worden de resultaten weergegeven die met de verschillende versterkertypes zijn verkregen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Vervaardiging van magnetische dunne lagen

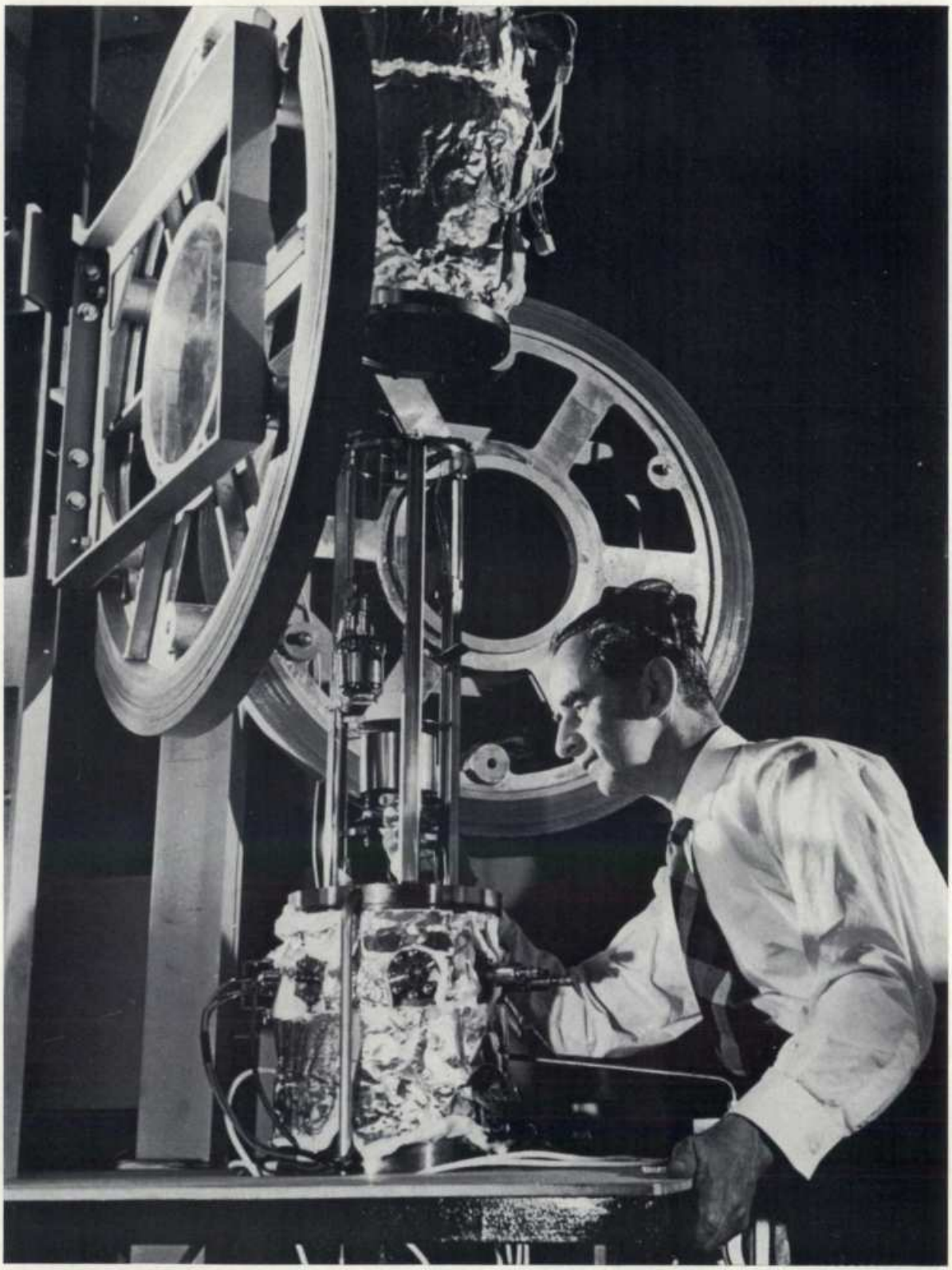


Foto Walter Nürnberg

Bij het vervaardigen van een geheugenmatrix van een magnetische dunne laag moet tijdens het opdampen een magnetisch veld worden aangelegd, om de elementen een eenassige anisotropie te geven. De elementen worden verkregen door nikkelijzer in hoogvacuüm op te dampen op een substraat dat zich op 300 °C bevindt en met een masker is bedekt. De foto toont een experimentele hoogvacuüminstallatie waarin dit opdampen kan gebeuren bij drukken van de orde van 10^{-9} torr. Ter ontgassing van de opdampruimte wordt de vacuümklok van dit toestel tot ca. 300 °C verhit. Warmteverliezen worden verminderd door isolatiemateriaal en aluminiumfoelie die om de apparatuur zijn aangebracht.

De grote Helmholtz-spoelen, die men bovenaan op de foto ziet, zijn opzij gezwenkt om het toestel gemakkelijker te kunnen schoonmaken en opnieuw van materiaal te kunnen voorzien.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Een reeks microgolfonderdelen op basis van coaxiale leiding en lintleiding

S. J. Robinson en P. T. Saaler

Inleiding

De algemene vraag naar microgolfonderdelen die een grote bandbreedte hebben maar klein van afmeting zijn, heeft de aandacht afgewend van de golfpijpen en meer gericht op coaxiale leiding en lintleiding. Het hieronder te beschrijven werk heeft betrekking op transmissieleidingen van beide laatstgenoemde typen en past dus geheel in deze ontwikkeling, zij het dat het uitgangspunt ervan slechts bestond uit bepaalde eisen ten aanzien van de bandbreedte. In het bijzonder hebben wij gebruik gemaakt van balansschakelingen met zg. hybridische vertakkingen en van dubbelkamfilters (in het Engels meestal interdigital filters genoemd). Op beide terreinen zijn een aantal vernieuwingen ingevoerd. Hieronder bespreken we een klein aantal onderdelen uit de reeks die onderzocht is, en wel die welke karakteristiek zijn voor de algemene tendentie van het onderzoek van de laatste jaren.

Wegens de nauwe toleranties en de aanwezigheid van omsloten geleiders moet men bij het ontwerpen in hoge mate rekening houden met de constructie-aspecten. Na de bespreking van de elektrische aspecten willen we daar dan ook enige woorden aan wijden.

Aan het eind van de tweede wereldoorlog werd voor de transmissie van microgolven in hoofdzaak gebruik gemaakt van golfpijpen. De gebruikte frequentiebanden lagen gewoonlijk rondom 1 GHz, 3 GHz en 10 GHz, welke frequenties ook thans nog veel gebruikt worden. De voornaamste toepassing van microgolven was destijds de radar, en een eenvoudig radarsysteem werkte in het algemeen binnen één zeer klein frequentiegebied. Er was derhalve weinig vraag naar een transmissieleiding die een groot frequentiegebied doorlaat. Nu zijn rechthoekige golfpijpen wel in staat om een band ter breedte van ca. 40 % van de centrale frequentie door te laten zonder dat hogere trillingswijzen optreden — ze worden dan ook nog steeds op grote schaal toegepast voor systemen die een vrij brede band vereisen, zoals communicatieverbindingen —, maar toch zijn er enige ernstige bezwaren. De effectieve bandbreedte wordt beperkt door twee verschijnselen: afsnijden bij lage frequenties en het optreden van hogere trillingswijzen (Engels: overmoding) bij hoge frequenties. Verder zijn golfpijpen groot en zwaar, in het bijzonder bij lage microgolffrequenties: een golfpijp voor 1 GHz (golflengte 30 cm) meet in doorsnee ongeveer 10 bij 20 cm. Om deze redenen zijn andere soorten transmissieleiding onderzocht en drie ervan zijn in gebruik gekomen: coaxiale leiding en lintleiding (ook wel draadleiding), de laatste zowel symmetrisch (Engels: strip-line) als asymmetrisch (Engels: microstrip). Symmetrische lintleiding bestaat uit twee geaarde platen waartussen zich een inwendige geleider van rechthoekige doorsnee bevindt (*fig. 1a*). Bij (symmetrische) draadleiding heeft de inwendige geleider een ronde doorsnee (fig. 1*b*), terwijl asymmetrische lintleiding uit slechts één geaarde plaat bestaat met daarboven een spanningvoerende geleider (fig. 1*c*). Al deze golfgeleiders vertonen, wanneer ze worden gebruikt in hun dominante trillingswijze, geen afsnijfrequentie; de bovengrens van het frequentiegebied wordt weer bepaald door het optreden van hogere trillingswijzen. Ze kunnen een veel bredere band bestrijken dan golfpijpen en zijn aanzienlijk kleiner en lichter. Nadelen zijn hun relatief sterke demping in vergelijking met die van een golfpijp en de moeilijkheden die het onderling verbinden van verschillende elementen met zich meebrengt. Bovendien heeft asymmetrische lintleiding nog een nadeel ten opzichte van coaxiale leiding en symmetrische lintleiding: behalve wanneer het zich op materiaal met een zeer hoge diëlektrische constante bevindt, straalt asymmetrische lintleiding enigszins, doordat de configuratie ervan niet gesloten is. Dit veroorzaakt verlies van vermogen en kan storing geven in naburige ketens. Daarom is asymmetrische lintleiding in het Mullard-laboratorium niet uitvoerig onderzocht. We zullen dit type leiding in dit artikel verder dan ook buiten beschouwing laten.

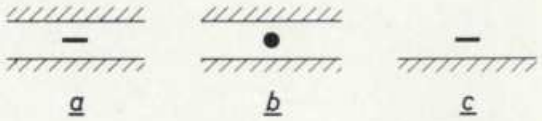


Fig. 1. De drie soorten transmissieleiding waaruit onderdelen voor microgolfschakelingen gemaakt zijn. *a*) Symmetrische lintleiding bestaat uit twee vlakke geaarde platen en een inwendige geleider met rechthoekige doorsnee. *b*) Bij draadleiding is de inwendige geleider rond. *c*) Asymmetrische lintleiding bestaat uit één geaarde plaat met daarboven een spanningvoerende draad.

S. J. Robinson, B. A. en P. T. Saaler, Ph.D., B.Sc. (Eng.), medewerkers van Mullard Research Laboratories, Redhill (Surrey), Engeland.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Coaxiale leiding is uitstekend bruikbaar voor het overbrengen van signalen met frequenties tot ten minste 10 GHz; wel veroorzaakt flexibele kabel bij deze frequentie reeds grote verliezen. Coaxiale leiding met lucht als diëlektricum wordt op grote schaal gebruikt voor de constructie van bepaalde schakelingselementen voor microgolven, in het bijzonder de zg. hybridische ring alsmede daarvan afgeleide schakelingselementen, zoals mengtrappen en fazediscriminators. Ook is er onderzoek verricht aan microgolffilters waarin coaxiale leiding is toegepast; in hoofdzaak laag doorlatende filters, band-doorlatende filters en band-onderdrukkende filters.

Symmetrische lintleiding (in het volgende kortweg: lintleiding) is pas op grotere schaal in gebruik gekomen nadat Bates [1] in 1956 de moeilijkheden had overwonnen die optreden bij het berekenen van de karakteristieke impedantie uit de afmetingen. Lintleiding heeft op zichzelf niet veel voordelen boven coaxiale leiding, maar men kan er gemakkelijker die typen onderdelen uit opbouwen waarvan de werking berust op elektromagnetische koppeling. In dergelijke onderdelen moeten de inwendige spanningvoerende geleiders van twee of meer transmissieleidingen zich zeer dicht bij elkaar bevinden, zodat naburige leidingen elektromagnetisch gekoppeld zijn. Door van deze koppeling gebruik te maken, kunnen verschillende richtingskoppelingen en microgolffilters worden ontworpen. Coaxiale leiding, die geheel gesloten is, leent zich hier niet voor, maar bij symmetrische lintleiding kan men een aantal binnengeleiders vlak bij elkaar tussen een gemeenschappelijk paar aardplaten aanbrengen. Verder heeft lintleiding nog een belangrijk voordeel boven golfpijpen of coaxiale leiding, nl. deze dat men de inwendige geleider op een plaat vast diëlektrisch materiaal door middel van een drukprocédé kan aanbrengen in de vorm van een dun koperbandje. Men legt er dan een tweede plaat van dezelfde dikte bovenop en bekleedt beide platen van buiten met koper; de beide koperlagen vormen de geaarde platen. Deze methode, die dikwijls eenvoudiger is toe te passen dan zijn tegenhanger met lucht als diëlektricum, is bijzonder geschikt voor het maken van gecompliceerde configuraties als filters en fazediscriminators, in het bijzonder wanneer er van één type een groot aantal moet worden geproduceerd. In de laatste jaren is in het Mullard-laboratorium volgens deze methodes een aantal onderdelen voor microgolfschakelingen gemaakt; enige voorbeelden ervan zullen hieronder nader beschreven worden.

[1] R. H. T. Bates, The characteristic impedance of the shielded slab line, IRE Trans. on microwave theory and techniques **MTT-4**, 28-33, 1956.

Hybridische vertakkingen en andere koppelingen

Een hybridische vertakking is in principe een element met vier toegangen (poorten). Het aan één dezer poorten toegevoerde vermogen wordt verdeeld (meestal half om half) over twee van de andere poorten, terwijl de vierde poort dan als geïsoleerd van de ingangspoort kan worden beschouwd. Sluit men twee tegengesteld geschakelde microgolfdiodes aan op de twee van elkaar geïsoleerde poorten, dan verkrijgt men een mengtrap in balansschakeling.

Een eenvoudige hybridische vertakking van coaxiale leiding of golfpijp bestaat uit een gesloten ring met vier poorten op onderlinge afstanden van $\frac{1}{4}\lambda$ of $\frac{3}{4}\lambda$. Een grotere bandbreedte verkrijgt men wanneer tussen twee poorten een inrichting wordt aangebracht die de faze omkeert; de vier poorten worden in dit geval symmetrisch om de ring geplaatst (*fig. 2*). Een aan poort P_1 toegevoerd signaal wordt dan gelijkelijk verdeeld over de poorten P_3 en P_4, waarbij de beide uitgangssignalen in tegenfaze zijn. Deze schakeling is gebruikt

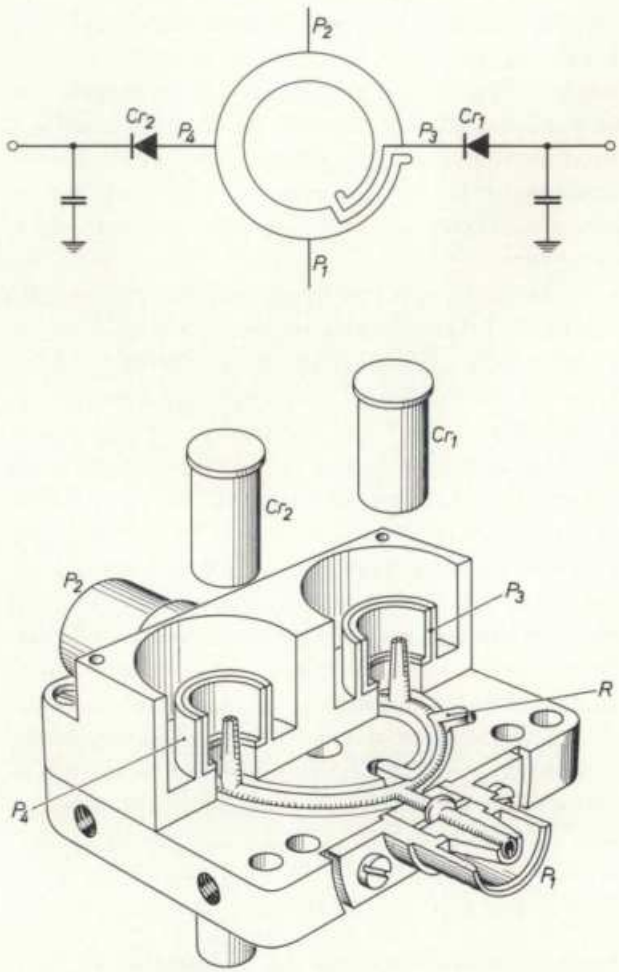


Fig. 2. Balans-mengtrap met fazedraaiende ring op basis van coaxiale leiding. Frequentieband 2,5-4,1 GHz, isolatie 15 dB. Het aan P_1 toegevoerde signaal wordt gelijk verdeeld tussen P_3 en P_4, waarbij de aan deze polen verschijnende uitgangssignalen in tegenfaze zijn. Cr_1 en Cr_2 zijn kristaldiodes. R hybridische ring met faze-omkering.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

als basis van een reeks mengtrappen voor microgolven, die in de handel gebracht worden door M.E.L. Equipment Company Ltd. In fig. 2 ziet men een dergelijke mengtrap voor het frequentiegebied 2,5-4,1 GHz.

In een meer recent ontwerp voor een mengtrap is de elektromagnetische richtingskoppeling toegepast waarvan men een „massieve" (uit een massief blok gemaakte) versie vindt afgebeeld in *fig. 3*. Hierin wordt een aan P_1 toegevoerd signaal gelijkelijk verdeeld tussen P_3 en P_4 (3-dB-koppeling), terwijl het signaal op P_2 theoretisch nul is — in werkelijkheid is het niet exact nul maar toch 25 dB zwakker dan het ingangssignaal. Wat de isolatie of voorkeursontkoppeling betreft, zijn de schakelingselementen op basis van coaxiale leiding of lintleiding minder goed dan die op basis van golfpijpen. De uitgangssignalen op P_3 en P_4 (fig. 3) vertonen bij alle frequenties een fazeverschuiving van 90° en daarom staat dit schakelingselement bekend als een 90°-koppeling. De frequentieband ervan is breder dan die van de ring met fazeomkering: men kan er gemakkelijk een frequentiegebied van 3 : 1 of 4 : 1 mee bestrijken. Voegt men één microgolfdiode aan zo'n koppeling toe, dan heeft men een mengtrap met één uitgang (engels: single ended mixer) verkregen. Een dergelijke schakeling voor de band van 7-11,5 GHz, waarin een gedrukte koppeling is toegepast, vindt men afgebeeld in *fig. 4*. Rust men een 3-dB-koppeling uit met *twee* diodes, dan verkrijgt men weer een balansmengtrap.

In *fig. 5* ziet men een variant van de 90°-koppeling van fig. 3. De twee inwendige geleiders gaan door een „scherm" (Engels: re-entrant section) in de vorm van een metalen blok. Deze configuratie is in Amerika ontworpen door Cohn [2], in het Mullard-laboratorium is er een gedrukte versie van ontwikkeld. Daarbij is het metaalblok vervangen door twee vlakke, niet geaarde, gedrukte koperlagen. Het voordeel van deze oplossing is dat de nauwe koppelspleet tussen de leidingen, die anders terwille van de 3-dB-koppeling vereist is, hier ontbreekt, waardoor de toelaatbare maatafwijkingen groter zijn. In onze „massieve" koppeling met scherm vindt de toevoer van het signaal plaats via een draadleiding; het voordeel dat men daarmee kan bereiken bij de produktie, wordt gedemonstreerd door de vermogensverdeler van *fig. 6*. Hier zijn de inwendige geleiders van de draadleidingen gemaakt van gewoon koperdraad, dat in het diëlektricum is gekit door het te verhitten met behulp van een elektrische stroom.

Microgolf-brugschakelingen als frequentie- en fazediscriminators

De 3-dB-90°-koppeling en de hybridische vertakking met fazedraaiing kunnen dienen als fazecomparator. Door vijf ervan onderling op een bepaalde wijze te

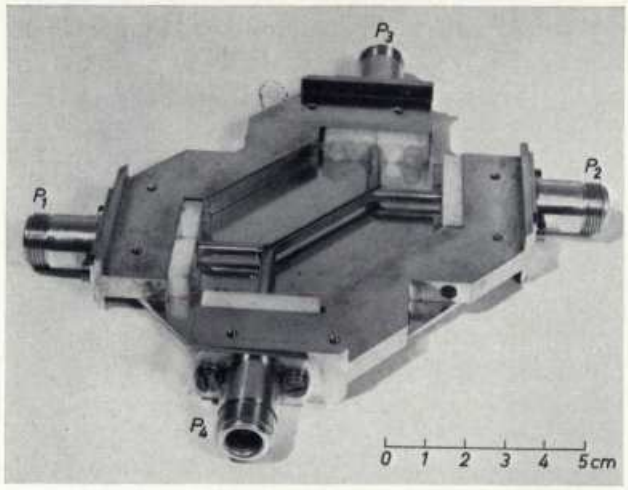


Fig. 3. „Massieve" 90°-koppeling (1,0-2,6 GHz). Deze koppeling verdeelt een bij P_1 binnenkomend signaal gelijk tussen P_3 en P_4 (voor 3-dB-koppeling); op P_2 verschijnt theoretisch geen signaal. Het stoorsignaal op P_2 is 25 dB zwakker dan het ingangssignaal. De uitgangssignalen op P_3 en P_4 hebben bij alle frequenties een fazeverschuiving van 90°.

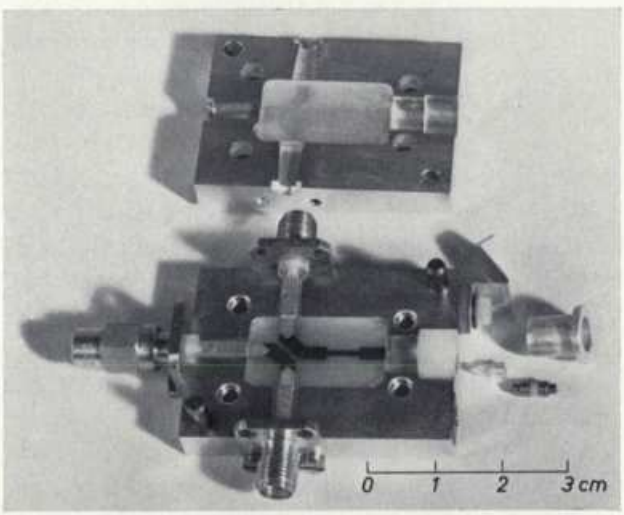


Fig. 4. Gedrukte mengschakeling met één uitgang voor 7-11,5 GHz. Bij 9,6 GHz is de verzwakking van het signaal van de lokale oscillator 20 dB en de staandegolfverhouding 1,3.

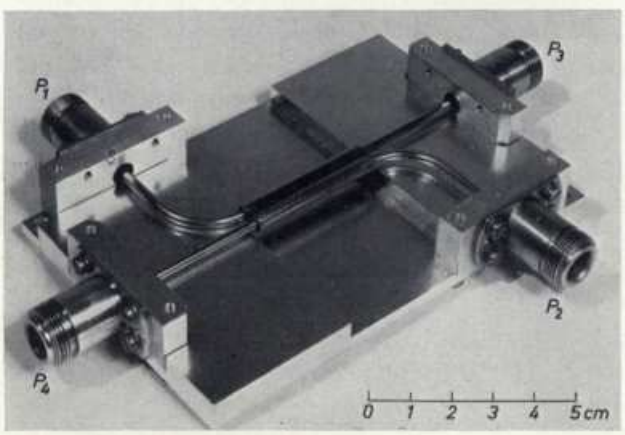


Fig. 5. Een 90°-koppeling met „scherm" en vervaardigd uit draadleiding (1,0-2,6 GHz). Koppeling 3 dB, isolatie 23 dB. Het scherm is een blok metaal waar de twee inwendige geleiders doorheen gaan.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

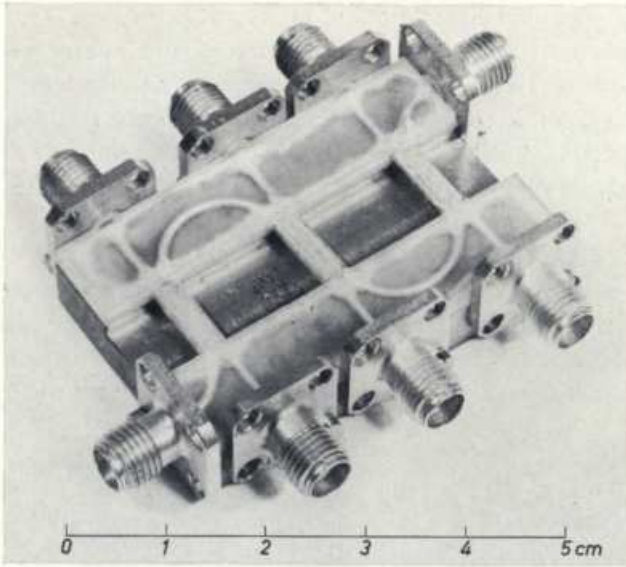


Fig. 6. Vermogensverdeler bestaande uit drie schermkoppelingen. De inwendige geleiders van de draadleiding zijn in het diëlektricum gekit door ze te verwarmen door middel van een elektrische stroom.

verbinden met stukken transmissieleiding, verkrijgt men een dubbele brugschakeling (Engels: twin-bridge-circuit) die vier uitgangen en één ingang heeft. De relatieve amplitudes van de uitgangssignalen hangen af van de lengten van de verbindingsleidingen en men kan er dus voor zorgen dat de frequentie ondubbelzinnig kan worden afgeleid uit de uitgangssignalen. Dergelijke brugschakelingen worden toegepast voor frequentie- en fazemeting in frequentiemeters en interferometersystemen. In een groot frequentiegebied kan er een zeer grote relatieve nauwkeurigheid mee bereikt worden (beter dan 1 %). In *fig. 7* ziet men een discriminator voor de 2-GHz-band waarin coaxiale, de faze omkerende hybridische ringvertakkingen met „massieve" transmissieleiding zijn toegepast. Een dergelijke discriminator is uitzonderlijk moeilijk te maken en zeer kostbaar, en daarom heeft men de laatste jaren druktechnieken en 90°-koppelingen toegepast. *Fig. 8* toont een gedrukte discriminator (voor de band van 2,5 tot 4,1 GHz) waarvan de aardplaat verwijderd is. De inwendige geleiders van de schermkoppelingen zijn eveneens zichtbaar, daar de hulpplaten ook zijn weggenomen.

Modulators, schakelaars en begrenzers

Uit diodes en richtingskoppelingen kan men een aantal andere balansschakelingen met grote bandbreedte samenstellen. Dit zijn o.a. modulators die de draaggolf onderdrukken, microgolfbegrenzers en schakelaars. Een driedelige passieve begrenzer kan worden

[12] S. B. Cohn, The re-entrant cross section and wide-band 3-dB hybrid couplers, IEEE Trans. on microwave theory and techniques **MTT-11**, 254-258, 1963.

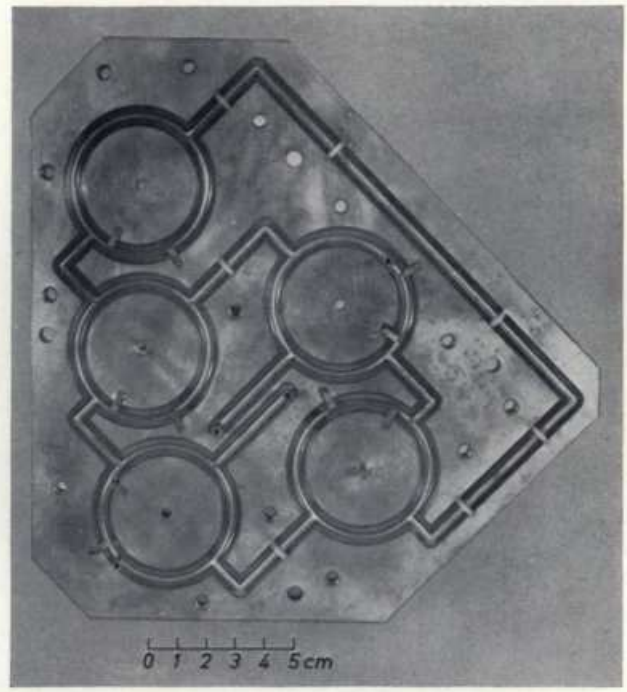


Fig. 7. Coaxiale fazediscriminator (1,7-2,6 GHz) waarin „massieve", coaxiale, de faze omkerende hybridische ringen zijn toegepast.

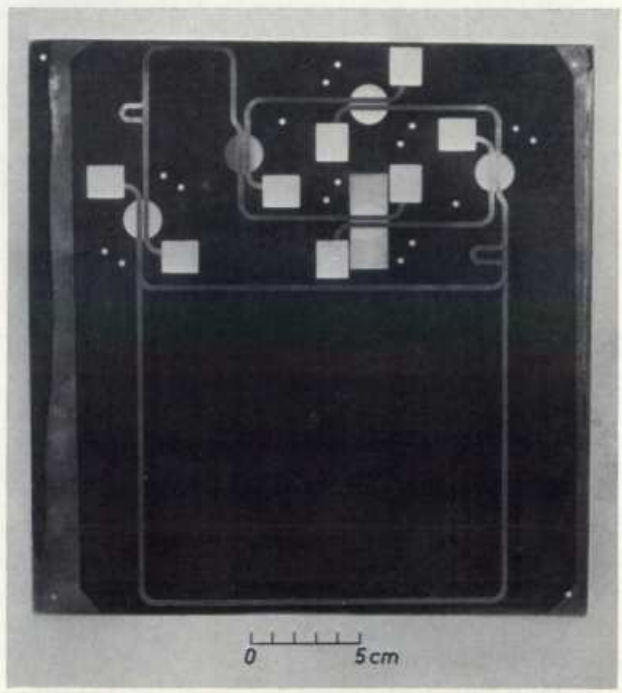


Fig. 8. Gedrukte fazediscriminator (2,5-4,1 GHz) waarvan de geaarde plaat is afgenomen. De inwendige geleiders van de schermkoppelingen zijn te zien, daar ook de hulpplaten zijn weggenomen.

verkregen door diodes aan te sluiten op zes poorten van de vermogensverdeler van fig. 6. Bij geringe signaalsterkte reflecteren de diodes sterk, maar bij ca. 1 mW zijn zij aangepast aan de leidingsimpedantie. De tussenschakeldemping van de opstelling is derhalve klein

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

bij laag signaalniveau, maar bij hoog signaalniveau stijgt deze tot ca. 20 dB. Een dergelijk onderdeel kan gebruikt worden om een gevoelige ontvanger te beschermen tegen overbelasting.

Een *P-I-N*-diode richt microgolfsignalen niet gelijk, maar werkt als een elektrisch bestuurbare variabele impedantie. Men kan met twee dergelijke diodes en een 3-dB-koppeling schakelingen maken die werken als schakelaar, als verzwakker of als modulator. Dergelijke schakelingen zijn vervaardigd en er is in een frequentiegebied van 2 tot 6 GHz een rejectiefactor van 20 dB mee bereikt bij goede aanpassing aan de ingangsketen.

Het dubbelkamfilter is door Matthaei [3] ontwikkeld uit het $\frac{1}{2}\lambda$-filter en wordt thans op grote schaal gebruikt. Het bestaat uit twee kammen met afgestemde tanden; iedere tand is capacitief gekoppeld met zijn buurman (die tot de andere kam behoort), en is in het ideale geval kortgesloten aan het ene en open aan het andere eind (*fig. 9a*).

Deze filters kan men zowel een grote bandbreedte geven (3 : 1) als een kleine (minder dan 10% van de centrale frequentie). De grenzen worden gesteld door de kleinste breedte van de koppelspleten tussen de tanden en de breedte van de tanden zelf. De lengte van

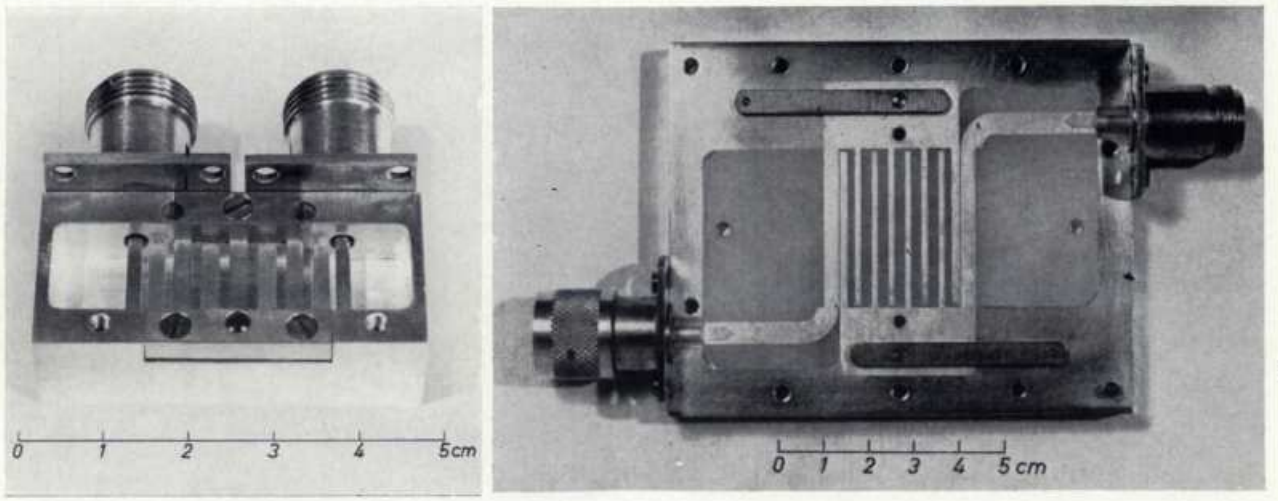


Fig. 9. *a*) „Massief" dubbelkamfilter voor 4-8 GHz. Tussenschakeldemping 0,5 dB. Staandegolfverhouding 2,0. Het filter bestaat uit twee stellen afgestemde tanden (kammen). Iedere tand is capacitief gekoppeld met zijn buurman, in het ideale geval kortgesloten aan één eind en open aan het andere eind.
b) Voorbeeld van een gedrukt dubbelkamfilter.

Filters voor microgolven

Met golfpijpen zijn filters met zeer grote bandbreedte moeilijk te maken; lintleiding en coaxiale leiding zijn er daarentegen zeer geschikt voor. Men kan b.v. een laag doorlatend filter verkrijgen door het in cascade schakelen van een aantal stukken transmissieleiding die beurtelings een hoge en een lage karakteristieke impedantie hebben (zg. filter met getrapte impedantie).

Bandfilters verkrijgt men door het koppelen van een aantal trilholtes of afgestemde stukken leiding. Bij deze onderdelen hebben lintleiding en draadleiding hun meest waardevolle toepassing gevonden.

De meest gangbare typen van uit stukken transmissieleiding samengestelde filters zijn:

1) Een reeks stukken ter lengte van $\frac{1}{2}\lambda$, gekoppeld door stukken ter lengte van $\frac{1}{4}\lambda$.

2) Dubbelkamtransmissieleidingen (Engels meestal: interdigital transmission line).

3) Kamvormige transmissieleidingen.

de tanden is bij de centrale frequentie ongeveer $\frac{1}{4}\lambda$; bij hoge frequenties zijn de tanden dus zeer kort. Daar de tanden voor een goede werking relatief niet al te breed mogen zijn ($\frac{1}{3}$ van de lengte of minder), en de breedte wordt bepaald door de afstand tussen de geaarde platen, moet deze afstand klein gemaakt worden, hetgeen, op de lengte van de tanden na, alle afmetingen reduceert. Het is daardoor moeilijk dubbelkamfilters goed te laten werken bij frequenties die ver boven 10 GHz liggen. Men kan de situatie verbeteren door als onderlaag voor het drukproces materiaal met een hoge diëlektrische constante te gebruiken, daar, voor gelijke tand-impedantie, de breedte dan sterker gereduceerd wordt dan de lengte (fig. 9*b*). De ontwerpvergelijkingen van Matthaei gelden slechts bij benadering en het is nuttig gebleken deze filters (in gedrukte vorm) uit te voeren als afzonderlijke kammen van beryllium-koperfoelie die tussen lagen van niet met metaal bekleed diëlektrisch materiaal worden gemonteerd. Het is dan vrij gemakkelijk om de ene kam ten opzichte van

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

de andere te verschuiven en aldus de koppelspleten experimenteel in te stellen. De verkorting van de tanden aan hun open eind moet experimenteel gevonden worden; voor filters met geringe bandbreedte luistert dit zeer nauw, vooral boven 3 GHz.

Nauw verwant met het dubbelkamfilter is het kamfilter, dat eveneens van Matthaei afkomstig is. Dit filter heeft slechts één kam, waarvan alle tanden aan hetzelfde eind zijn kortgesloten. Om een doorlaatband te krijgen, moet het andere eind van iedere tand capacitief belast worden, zodat kamfilters alleen geschikt zijn als men kan volstaan met een kleine bandbreedte. Zij hebben het voordeel boven dubbelkamfilters dat ze verstembaar zijn in een groot frequentiegebied door de capaciteit te veranderen. Zo kan men b.v. een kamfilter maken dat afstembaar is op twintig verschillende U.H.F.-televisiekanalen. Het kamfilter is in het bijzonder geschikt voor het U.H.F.-gebied, daar de tanden tamelijk kort gemaakt kunnen worden; in het midden van de band gewoonlijk $\frac{1}{8}\lambda$.

Ook andere filters op basis van coaxiale leiding of lintleiding zijn bestudeerd. Bijzonder geschikt voor een bandfilter met grote bandbreedte is een leiding waarlangs op onderlinge afstand van $\frac{1}{4}\lambda$ al of niet kortgesloten takken zijn aangesloten. Om een geringe bandbreedte te verkrijgen, kunnen de voor de takken vereiste impedantiewaarden te groot worden dan dat men ze mechanisch kan vervaardigen. Een gedrukt bandfilter van dit type (2,5 tot 4,1 GHz) vindt men in *fig. 10*, te zamen met een gedrukt, laag doorlatend filter met getrapte impedantie van het type dat aan het begin van dit hoofdstuk genoemd is.

Constructiemethodes

Zijn de toelaatbare maatafwijkingen klein, dan kan men bij kleine schakelingselementen op constructieve moeilijkheden stuiten; wil men gangbare werkplaatsmethodes toepassen, dan moet het ontwerp zeer zorgvuldig gemaakt worden.

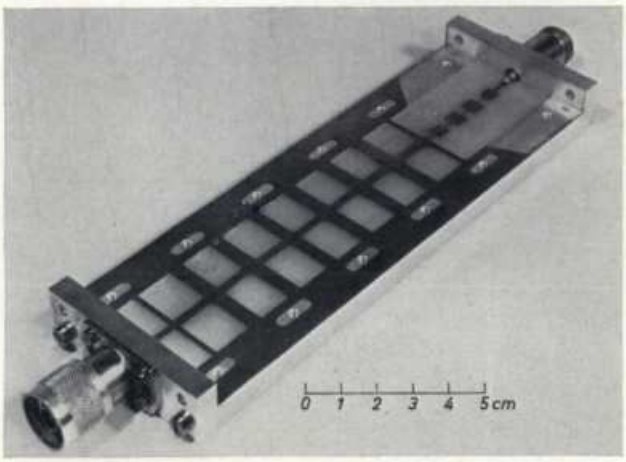


Fig. 10. Bandfilter bestaande uit een leiding waarop gedrukte zijtakken zijn aangebracht (links) en laagdoorlatend filter met getrapte impedantie (rechts). Doorlaatband 2,5-4,1 GHz, tussenschakeldemping 1 dB.

Bij toepassing van drukprocédés is het hoofdprobleem hierin gelegen dat de toelaatbare relatieve maatafwijkingen kleiner zijn dan men bij gedrukte bedrading gewend is. De optische systemen die bij het drukken gebruikt worden en de stabiliteit van het diëlektrische materiaal vormen een hinderlijke beperking.

Voor het drukken van onderdelen op basis van lintleiding bestaan er drie bruikbare methodes. Bij de eerste, die het meest gebruikt wordt maar het minst nauwkeurig is, wordt eerst van een tekening een fotografisch negatief gemaakt. Dit gebruikt men om een afdruk te maken op met koper bekleed diëlektrisch materiaal dat bedekt is met fotolak.

Bij de tweede methode, die gebruikt wordt voor uiterst nauwkeurig werk, wordt met behulp van een precisiemachine een negatief gesneden uit een dikke plaat kunststof die bedekt is met materiaal dat geen licht doorlaat. Met deze methode kan een nauwkeurigheid van enkele microns bereikt worden, maar de afmetingen van het negatief kunnen in de loop van de tijd veranderen en zijn ook afhankelijk van de temperatuur.

De derde methode is zeer eenvoudig: er wordt uit een speciaal, gelaagd materiaal een negatief gemaakt door de bovenlaag, die ondoorzichtig is, in te snijden en het overbodige te verwijderen. De hiermee bereikte nauwkeurigheid is ongeveer 100 μm.

Om goede, reproduceerbare resultaten te krijgen, moet men bij alle drie de methodes een grote ervaring hebben in het etsen van het koperpatroon. We hebben gevonden dat de koperpatronen voor dubbelkamfilters, waarvan de kammen niet gemaakt worden op bekleed diëlektrisch materiaal, maar van los metaalfoelie, binnen 25 μm gereproduceerd kunnen worden. In dit geval wordt beryllium-koper gebruikt ter wille van de vereiste mechanische sterkte.

Als diëlektrica worden bestraalde polystyrenen of polyalkenen met brugverbindingen gebruikt, welke materialen lage verliezen hebben. Deze stoffen hebben in het microgolfgebied een verliesfactor van de orde van grootte van 10^{-4}. Voor filters met kleine bandbreedte verdienen de polyalkenen de voorkeur, niet in de eerste plaats omdat ze iets lagere verliezen hebben, maar omdat ze zachter zijn, wat van belang is als er afstemschroefjes ingedraaid moeten worden.

Een blik in de toekomst

Het is moeilijk met coaxiale leiding en lintleiding schakelingselementen te maken die ver boven 10 GHz

[3] G. L. Matthaei, Interdigital band-pass filters, IRE Trans. on microwave theory and techniques **MTT-10**, 479-491, 1962.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

goed werken. De oorzaak daarvan ligt in de wijze van vervaardigen, daar de afmetingen (diameter of afstand van de geaarde platen) klein gemaakt moeten worden om ongewenste koppeling met andere trillingswijzen te voorkomen; ook vergroot een verkleining van de afmetingen de verliezen. Bovendien hebben kleine ongelijkmatigheden bij hoge frequenties een grotere invloed dan bij lage, doordat ze gewoonlijk niet in verhouding tot de overige afmetingen verkleind worden. Een en ander wordt nog verergerd door de ongunstige lengte-dikteverhouding van de leiding, die onvermijdelijk is in schakelingselementen waarin de leiding afgestemd is, d.w.z. ongeveer $\frac{1}{4}\lambda$ lang is. Een verder nadeel dat inherent is aan het gebruik van conventionele lintleiding of coaxiale leiding, wordt gevormd door de vrij slechte eigenschappen van de overgang van coaxiale kabel naar lintleiding of van coaxiale pluggen. Zelfs subminiatuurpluggen reflecteren bij omstreeks 20 GHz al vrij sterk. Toch wordt, uitgaande van conventionele drukprocédé's, voor dit frequentiegebied aan dit probleem gewerkt.

Enige van de genoemde fundamentele moeilijkheden worden thans te lijf gegaan door miniatuurschakelingen aan te brengen op keramisch materiaal. Er is thans keramisch aluminiumoxide beschikbaar dat zeer geringe verliezen heeft en waarvan de diëlektrische constante ongeveer 10 bedraagt; daarop kan men lintleiding aanbrengen door opdampen. Een aldus gemaakte hybridische koppeling voor een mengtrap voor 7-11,5 GHz is ongeveer 2,5 mm² groot. Het is de bedoeling op deze wijze reeksen geïntegreerde schakelingen te vervaardigen; hierbij komen mengtrappen, filters enz. op één zelfde stuk diëlektrisch materiaal te liggen, waardoor afzonderlijke verbindingen overbodig zijn.

Een logisch hierop volgende stap is dat men voor het diëlektricum een halfgeleider met hoge specifieke weerstand neemt en elementen zoals diodes en transistors aan de schakeling toevoegt door middel van de gangbare methodes voor het maken van geïntegreerde schakelingen. Deze mogelijkheid wordt thans, in samenwerking met de microgolfgroepen van Associated Semiconductor Manufacturers Limited, nader onderzocht.

Samenvatting. Er wordt een kort overzicht gegeven van werk aan passieve onderdelen voor microgolfschakelingen op basis van coaxiale leiding en lintleiding. De aandacht is in hoofdzaak gericht op het ontwerpen van hybridische vertakkingen en richtingskoppelingen, mengtrappen voor microgolven, filters en fazediscriminators. Er is ook enig werk gedaan aan microgolfmodulators, -schakelaars en -begrenzers. Er worden algemene ontwerpcriteria gegeven en er wordt ingegaan op de wijze van vervaardiging. Het blijkt dat men met moderne drukprocédés kleinere en goedkopere onderdelen op basis van lintleiding kan maken dan op basis van coaxiale leiding, bij vergelijkbare eigenschappen.

Een opto-akoestische correlator voor radardetectie

J. S. Palfreeman

Inleiding

Het probleem, bij lange-afstandsradar een groot radiaal scheidend vermogen te realiseren, is bekend bij allen die met het ontwerpen van impulsradarsystemen te maken hebben.

Voor een grote dracht is een lange periode tussen de uitgezonden signalen vereist en, om de signaal-ruisverhouding op peil te houden, een groot gemiddeld zendvermogen; voor een groot radiaal scheidend vermogen is een kort signaal bij de ontvangst nodig. Bij korte-afstandsradar met groot scheidend vermogen wordt dit korte ontvangstsignaal verkregen door het uitgezonden signaal kort te kiezen.

J. S. Palfreeman, medewerker van Mullard Research Laboratories, Redhill (Surrey), Engeland.

Het piek-zendvermogen is gewoonlijk aan een maximum gebonden, dat b.v. wordt bepaald door diëlektrische doorslag in het antennesysteem. Deze begrenzing stelt, bij een gegeven gemiddeld vermogen, een ondergrens aan de verhouding van de duur van de uitgezonden impuls tot de periode tussen de uitgezonden impulsen. Bij een eenvoudig impulsradarsysteem wordt derhalve de minimum-impulsduur, en daardoor het maximale radiale scheidend vermogen bij een gegeven dracht, bepaald door het maximale piekvermogen van het systeem.

Impulscompressiesystemen [1] vormen één middel om deze beperking te vermijden. Het uitgezonden signaal, b.v. een golftrein met een zekere frequentiezwaai,

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

heeft een grote bandbreedte en wordt gedurende lange tijd uitgezonden. Na ontvangst wordt dit signaal in de tijd gecomprimeerd tot een impuls van korte duur $\Delta T = 1/\Delta F$, als ΔF de bandbreedte van het signaal is. Voor zulke systemen moet de vorm van de uitgezonden impuls nauwkeurig vastliggen en moet de impulscompressieschakeling zorgvuldig worden gedimensioneerd.

Een andere methode om impulscompressie te verkrijgen, is correlatiedetectie; hierbij komt het niet aan op een bepaalde vorm van het uitgezonden signaal, maar uitsluitend op de mate waarin de van het object afkomstige echo „past" op het uitgezonden signaal.

In het onderhavige artikel bespreken we in het kort de correlatiedetectie van signalen bij radar, de motieven om een opto-akoestisch systeem voor de correlatie te kiezen, en ten slotte een nieuwe correlator met twee vertragingslijnen waarbij één signaal in de tijd wordt omgekeerd. Enkele opto-akoestische overwegingen bij het ontwerpen van een geschikt systeem komen kort ter sprake, evenals de praktische uitvoering en de te verwachten prestaties van het systeem.

Correlatiedetectie

De correlatiefunctie $C(T_r)$ [2] — een maat voor de gelijkenis van twee tijdfuncties $f_1(t)$ en $f_2(t)$ — is het gemiddelde over lange tijd van het produkt van de beide functies waarvan er één over T_r in de tijd is verschoven (T_r is in dit geval het tijdsinterval tussen het uitzenden van het signaal en de ontvangst ervan); zie *fig. 1*. Voor aperiodieke functies kunnen we dit schrijven als:

$$C(T_r) = \int_{-\infty}^{+\infty} f_1(t)\, f_2(t + T_r)\mathrm{d}t.$$

In het geval van radar, waarbij een impuls van eindige tijdsduur T wordt uitgezonden, kan het signaal buiten het tijdsinterval T nul gesteld worden. De integrand is dan buiten het tijdsinterval T nul, zodat we voor de integraal kunnen schrijven:

$$C(T_r) = \frac{1}{2T}\int_{-T}^{+T} f_1(t)\, f_2(t + T_r)\mathrm{d}t. \quad . \quad . \quad (1)$$

In het te bespreken systeem hebben de twee golfpatronen dezelfde oorsprong, zij zijn nl. beide afgeleid van de uitgezonden impuls, maar de van het object ontvangen echo is aangelengd met ruis, zodat men voor $f_2(t)$ kan schrijven $f_1(t - T_r) + f_N(t)$, waarin $f_N(t)$ de ongewenste ruis voorstelt. De integraal wordt dan:

$$C(T_r) = \frac{1}{2T}\int_{-T}^{+T} f_1(t)\,\{f_1(t) + f_N(t + T_r)\}\,\mathrm{d}t.$$

Dit procédé is een krachtig middel om een gegeven signaal te midden van ruis te herkennen [3]. Het is daarom van nut bij radar en sonar, waar deze omstandigheid zich vaak voordoet. Wat ruisonderdrukking betreft, heeft het eigenschappen die overeenkomen met die van een aangepast filter.

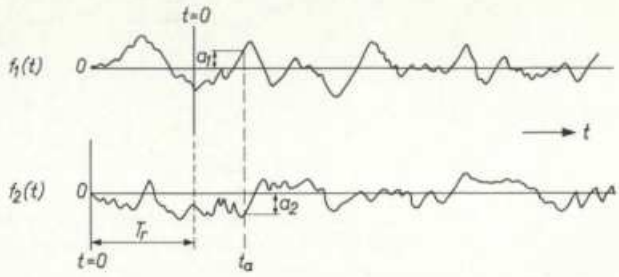


Fig. 1. Het correleren van functies. De figuur toont twee functies van de tijd, $f_1(t)$ en $f_2(t)$, waarvan de eerste een tijd T_r vertraagd is. De correlatiefunctie is het gemiddelde over lange tijd van het produkt van de twee functies, waarvan er een over T_r in de tijd is verschoven. Op het tijdstip t_a is (a_1) $(-a_2)$ het gezochte produkt.

Een eenvoudige toepassing van dit type detectie op een radarsignaal toont *fig. 2*. Het signaal van de zender wordt zowel aan de antenne toegevoerd als aan een vertragingslijn met variabele vertraging T_d. De echo van het object, ontvangen na een tijd T_r, wordt in de multiplicator met het vertraagde signaal gecorreleerd; de integratie wordt uitgevoerd door het laagdoorlatende filter. De maximale correlatie treedt op als $T_r = T_d$.

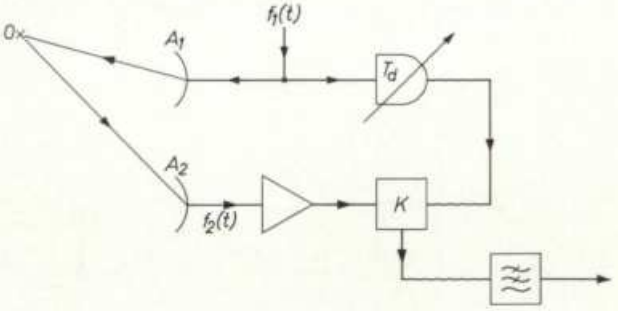


Fig. 2. Een correlator met variabele vertraging voor detectie van radarsignalen. Het ingangssignaal $f_1(t)$ van de zender wordt zowel aan de radar-zendantenne A_1 als aan de vertragingslijn met variabele vertraging T_d toegevoerd. Het signaal $f_2(t)$ van het object O wordt van de ontvangantenne A_2 na versterking toegevoerd aan een multiplicator K, waarvan het andere ingangssignaal het uitgangssignaal van de vertragingslijn is. Het uitgangssignaal van de multiplicator gaat naar een laag-doorlatend filter. De multiplicator en het filter vormen samen de correlator. De gehele dracht wordt bestreken door de vertragingstijd te variëren.

[1] H. O. Ramp en E. R. Wingrove, Principles of pulse compression, IRE Trans. on military electronics **MIL-5**, 109-115, 1961.
[2] P. M. Woodward, Probability and information theory, Pergamon Press, Londen 1957.
[3] M. I. Skolnik, Introduction to radar systems, hfdst. 9, McGraw-Hill, New York 1962.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Fig. 3 illustreert een meerkanaals-correlatiedetector waarin de vertraging van het signaal tot stand komt door een vertragingslijn met aftappingen. De dracht is verdeeld in een aantal gelijke stukken, corresponderend met het aantal aftappingen. De echo van een object in een van deze stukken geeft een correlatie op een bepaalde aftapping, en de totale vertraging correspondeert met de gehele dracht. Bij een radarsysteem met een dracht van 150 km en een radiaal scheidend vermogen van 150 m zou de vertragingslijn 1000 aftappingen moeten hebben, een totale vertragingstijd van 1 ms en een bandbreedte van ten minste 1 MHz. Dit is momenteel met een enkel systeem niet te realiseren, maar het is denkbaar dat men het in de toekomst met geïntegreerde schakelingen zal kunnen verwezenlijken.

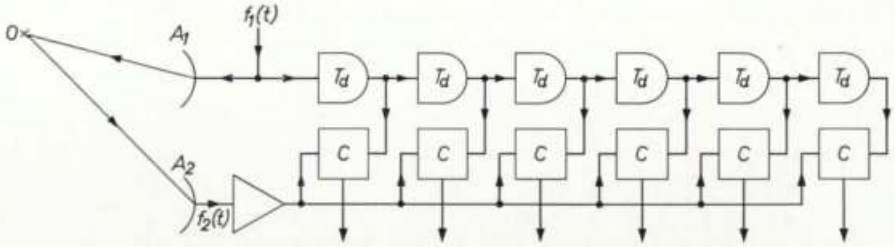


Fig. 3. De afgetapte vertragingscorrelator. De vertragingslijn is op regelmatige afstanden afgetapt. Het uitgangssignaal van iedere aftapping gaat naar een correlator (*C*).

Correlator met één vertragingslijn

Fig. 4 toont een methode om een zelfde werking te verkrijgen zonder gebruik te maken van een vertragingslijn met vele aftappingen en van individuele multiplicators. Dit systeem maakt gebruik van een *foto-elastische* vertragingslijn.

Bij een foto-elastische vertragingslijn wordt opvallend licht gemoduleerd door de spanning in het vertragingsmedium, zodat op ieder ogenblik de volledige spanningsverdeling in de vertragingslijn te zien is [4]. (Op dit proces komen we nog nader terug; voor het ogenblik zullen we aannemen dat het verschijnsel lineair is.) Een staafvormige foto-elastische vertragingslijn kan beschouwd worden als een vertragingslijn met oneindig veel aftappingen, waarin de afstand langs de staaf het tijdsinterval vertegenwoordigt dat de spanningsgolf nodig had om een gegeven punt te bereiken.

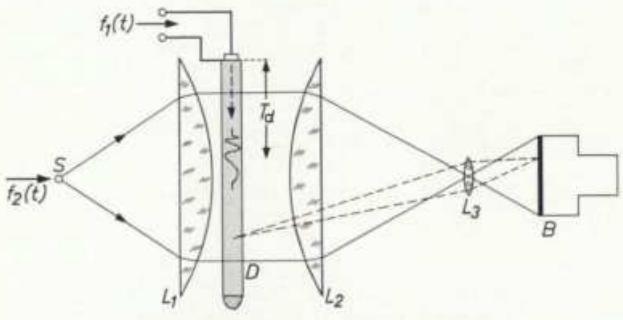


Fig. 4. De „ruimtelijke" correlator met één vertragingslijn. Een lichtbron *S*, gemoduleerd door het signaal $f_2(t)$, bestraalt een ultrasone vertragingslijn *D*. Het licht wordt door de lens L_1 op *D* gecollimeerd. Het ingangssignaal $f_1(t)$ van *D* moduleert het licht nog eens. De lens L_2 beeldt de bron *S* af op een derde lens L_3, die een beeld van de staaf vormt op de geheugenbuis *B*.

In de opto-akoestische correlator [5] moduleert het ontvangen signaal een lichtbron, die de foto-elastische vertragingslijn bestraalt, met de functie $f_2(t)$. De lichtintensiteit wordt ten tweeden male gemoduleerd met de functie $f_1(t)$ door de foto-elastische vertragingslijn, waarbij de vertragingstijd T_d correspondeert met een afstand langs de lijn. Het vermenigvuldigingsproces is deze dubbele modulatie van het licht. De intensiteit wordt gedurende een periode geïntegreerd. De aanwezigheid van een object op een bepaalde afstand blijkt uit een grote gemiddelde lichtintensiteit in het corresponderende punt van de staaf.

De verdeling langs de staaf van de hoeveelheid licht die in een zekere correlatieperiode wordt doorgelaten, is de functie $C(s)$, waarin de plaatscoördinaat s overeenkomt met T_r in verg. (1). In het ultrasone geval, waarin de signalen $f_1(t)$ en $f_2(t)$ een draaggolf van frequentie f_0 moduleren, fluctueert de lichtintensiteit eveneens met deze frequentie.

Het ruimtelijke scheidend vermogen (het omgekeerde van de lengte van de lichtvlek langs de staaf) is evenredig met de bandbreedte van het signaal; de tijd waarin de correlatie van een object wordt gevormd, is de duur van de uitgezonden impuls.

Voor toepassing in de praktijk is deze methode bezwaarlijk: om de afstand van een object te bepalen moet men een groot aantal integrerende fotodetectors langs de staaf verdelen. Wil men één uitgangssignaal krijgen, waarbij het signaaltijdstip correspondeert met de afstand van het object, dan heeft men nog een aftastmechanisme nodig om de rangschikking van de gegevens in de ruimte om te zetten in een rangschikking in de tijd.

Deze omzetting van „naast-elkaar" in „na-elkaar" kan geschieden door elektronisch integreren: men beeldt de foto-elastische vertragingslijn af op een geheu-

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

genbuis en leest de vastgelegde signalen af met een aftastende elektronenbundel. Het grote aantal fotodetectors wordt aldus vermeden.

In de praktijk zijn de beide signalen meestal modulaties van een draaggolf. Het scheidend vermogen van de geheugenbuis moet dan beter zijn dan de afstand die correspondeert met de geluidsgolflengte van de draaggolf. Het scheidend vermogen dat hiervoor vereist is kan vele malen groter zijn dan het scheidend vermogen, berekend met alleen de bandbreedte als maatstaf. Het resulterende systeem is verre van ideaal, met name ten gevolge van niet-lineariteit van de geheugenbuis en van het hoge ruisniveau.

Correlator met twee vertragingslijnen

De methode die in het Mullard-laboratorium in ontwikkeling is [6], maakt gebruik van *twee* foto-elastische vertragingslijnen; zie *fig. 5*.

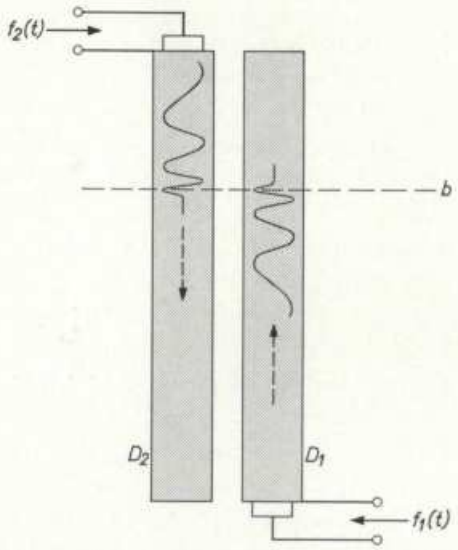


Fig. 5. Een correlator met twee vertragingslijnen. De twee signalen $f_1(t)$ en $f_2(t)$ verplaatsen zich in tegengestelde richtingen in de staven D_1 en D_2; zij zijn gecorreleerd in het punt b. In dit punt bestaat de correlatie gedurende de gehele tijd waarin de signalen het passeren, d.i. gedurende een hele impulsduur.

Het uitgezonden signaal wordt aan de ene vertragingslijn toegevoerd en moduleert het licht met de functie $f_1(t)$. Het ontvangen signaal, dat in *tegengestelde* richting aan de tweede lijn wordt toegevoerd, moduleert het licht met $f_2(t)$. Het produkt van deze twee lichtmodulaties is weer een correlatie, ruimtelijk verdeeld langs de vertragingslijn, met dit verschil dat de fluctuaties in de lichtintensiteit een draaggolffrequentie $2f_0$ hebben. In de figuur is de modulatie als een golftrein met een zekere frequentiezwaai voorgesteld, en men ziet dat slechts in één punt op de vertragingslijnen identieke stukken van de golven elkaar ontmoeten: alleen bij dit punt is er een noemenswaardige correlatie, en deze correlatie bestaat nu gedurende de gehele duur van het signaal. Deze situatie is wederom niet ideaal, om de in het vorige hoofdstuk uiteengezette redenen.

Laten we nu echter eens het geval beschouwen dat het signaal in een van de staven *in de tijd is omgekeerd*; zie *fig. 6*. Hier ziet men weer twee golven met frequentiezwaai die zich in tegengestelde richtingen voortplanten, één in elke foto-elastische staaf. Het ene signaal heeft de hoogste frequentie aan het begin van de impuls, het andere, in de tijd omgekeerde, signaal heeft de laagste frequentie aan het begin. De correlatie is nu maximaal op het ogenblik dat de beide signalen elkaar volledig dekken; op alle andere ogenblikken is de correlatie gering. Op het ogenblik dat er correlatie is, bestaat deze nu over de gehele lengte van de impuls.

De situatie is nu omgekeerd vergeleken met vroeger in zoverre dat we „tijd" en „ruimte" verwisseld hebben. De integratie is nu een sommering van het door-

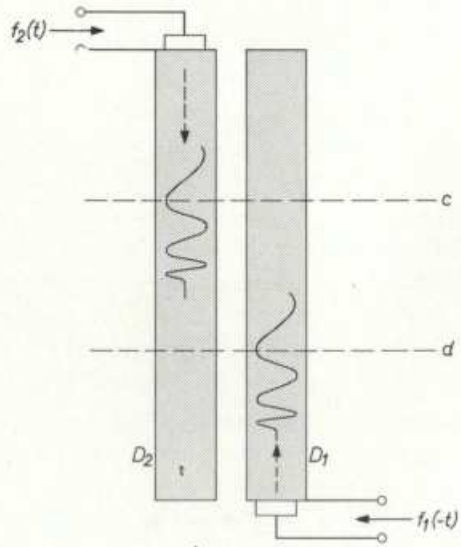


Fig. 6. Een correlator met twee vertragingslijnen. Een van beide signalen, $f_1(-t)$, is nu omgekeerd in de tijd, en de signalen zijn gecorreleerd op het ogenblik dat zij elkaar volledig bedekken. De correlatie bestaat slechts gedurende korte tijd, maar beslaat de gehele impulslengte langs de staaf tussen c en d.

gelaten licht over alle punten van de staaf, en de correlatiecoëfficiënt $C(T_r)$ is nu een directe functie van de tijd. De tijd gedurende welke de correlatie bestaat is kort vergeleken met de impulsduur, en wel ongeveer gelijk aan het omgekeerde van de bandbreedte van de te correleren signalen.

Dit procédé leidt direct tot het gewenste systeem met één uitgangssignaal. De correlatie wordt nu gedetecteerd door het licht dat over de hele lengte van de staaf

[4] C. F. Brockelsby en J. S. Palfreeman, Ultrasone vertragingslijnen en hun toepassing in de televisie, Philips techn. T. **25**, 326-347, 1963.
[5] R. W. Wilmotte, Instantaneous cross correlation, final report R.A.D.C. Contract No. AF 30, AD 215485, sept. 1957.
[6] A. Browne, An optical correlation technique, I.E.E. Conf. on delay devices for pulse compression, 48-57, 1966.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

wordt doorgelaten, te concentreren op een fotodetector; het correlatiesignaal wordt gedragen door een golf met een frequentie die gelijk is aan tweemaal de draaggolffrequentie van de signalen die het licht moduleren.

Dit systeem is een soort impulscompressiesysteem, en het kan worden gebruikt voor iedere conventionele toepassing van impulscompressie. Het heeft voorts het voordeel dat, aangenomen dat een der signalen in de tijd kan worden omgekeerd, de details van de uitgezonden inpuls niet ter zake doen (in tegenstelling met b.v. een impulscompressiesysteem met lineaire FM, waarbij men hoge eisen moet stellen aan de lineariteit van de frequentiezwaai). Hetzelfde geldt voor de gelijkvormigheid van de impulsen onderling, omdat een ontvangen signaal alleen gecorreleerd wordt met het uitgezonden signaal waarvan het de echo is.

Het foto-elastisch proces

Wordt een isotroop doorschijnend medium mechanisch belast, dan wordt het dubbelbrekend [7]: de effectieve brekingsindex hangt dan af van de richting van de belasting en van de polarisatie van het licht. Brengt men op twee evenwijdige vlakken van een stuk materiaal een loodrechte druk of trek aan, dan liggen de hoofdassen van de spanningstoestand, en daarmee de polarisatierichtingen waarvoor de verandering van de brekingsindex extreem is, respectievelijk evenwijdig met en loodrecht op deze vlakken. Een lichtstraal die in een van deze richtingen gepolariseerd is, vertoont een fazeverschil ten opzichte van een lichtstraal die gepolariseerd is in de andere richting.

Bij een zuivere schuifspanning in de zijvlakken liggen de hoofdassen van de spanningstoestand onder 45°; er ontstaat weer een maximaal fazeverschil tussen twee lichtstralen als deze gepolariseerd zijn in die asrichtingen (zie *fig. 7*).

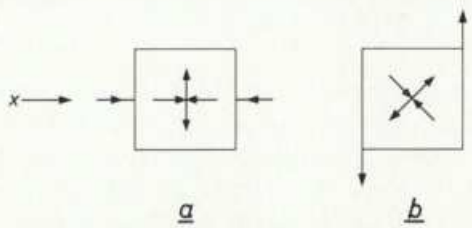


Fig. 7. De hoofdassen voor longitudinale (*a*) en transversale spanningsgolven (*b*) die zich in de *x*-richting voortplanten.

In akoestische (ultrasone) vertragingslijnen kan de spanning zich in het medium voortplanten als longitudinale of als transversale golf. Voor ons doel moet het medium doorschijnend zijn, weinig akoestische verliezen hebben, een groot spanningsoptisch effect vertonen en een grote brekingsindex bezitten. Het meest geschikte materiaal is ongetwijfeld kwartsglas, hoewel in bepaalde omstandigheden ook glas of water bruikbaar zijn. Transversale golven verdienen de voorkeur, omdat deze langzamer lopen: de vertraging bij een gegeven lengte is daardoor ongeveer 50% groter dan bij longitudinale golven. Bovendien treedt er bij transversale golven geen conversie van trillingswijzen op aan de begrenzingen van de vertragingslijn [8], hetgeen valse signalen zou kunnen veroorzaken.

Fig. 8 illustreert de dubbele breking. Het door een polarisator vlak gepolariseerde licht kan worden ontbonden in twee gelijke, onderling loodrechte componenten met dezelfde faze. Laat men deze door het dubbelbrekende materiaal gaan, dan ontstaat er een fazeverschil, zodat het licht nu elliptisch gepolariseerd is. Stuurt men dit licht door een analysator die loodrecht op de polarisator staat, dan krijgt men een enkele component met een intensiteit

$$I = \tfrac{1}{2}I_0(1 - \cos\Theta) = I_0 \sin^2 \tfrac{1}{2}\Theta, \quad \ldots \quad (2)$$

waarbij Θ evenredig is met de lengte waarover opto-akoestische wisselwerking optreedt, alsmede met de mechanische spanning σ, die in de ultrasone vertragingslijn op zijn beurt evenredig is met de elektrische spanning E op de transducent. Deze karakteristiek is weergegeven in *fig. 9*. Als de assen van polarisator en analysator onderling loodrecht staan en het dubbelbrekende materiaal niet mechanisch wordt belast wordt er geen licht doorgelaten. Voor kleine spanning is de σ-I-karakteristiek ruwweg kwadratisch, zodat een sinusvormige spanning in frequentie verdubbeld wordt (zie σ_1 en I_1 in fig. 9).

Een vrijwel *lineaire* responsie kan worden verkregen door het werkpunt te verschuiven naar een punt dat overeenkomt met een fazeverschil $\pi/2$ van de twee onderling loodrechte componenten (σ_2 en I_2 in fig. 9). Deze verschuiving kan men bewerkstelligen door een statische spanning in de staaf aan te brengen of, wat men gewoonlijk doet, een kwartgolflengteplaatje tussen polarisator en analysator te plaatsen, met de assen onder 45° met de polarisatierichting. In dit geval is de intensiteit:

$$I = \tfrac{1}{2}I_0(1 + \sin\Theta),$$

en deze is binnen 5% lineair in een intensiteitsgebied van $\frac{3}{4}I_0$ tot $\frac{5}{4}I_0$.

Ultrasone transducenten

De transducent die bij de constructie van ultrasone vertragingslijnen het meest wordt gebruikt, is een dun piëzo-elektrisch kwartskristal, met de grondfrequentie van de diktetrilling gelijk aan de draaggolffrequentie [8]. Deze transducent wordt op de kwartsglazen staaf bevestigd met behulp van een geleidende

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

laag, die de ene elektrode van het kristal vormt; op de achterkant van het kristal wordt de andere elektrode aangebracht. Tussen deze elektrodes wordt de spanning aangelegd. Afhankelijk van de richting van de kristalassen in het schijfje, kunnen longitudinale dan wel transversale golven worden opgewekt.

De frequentiekarakteristiek van een dergelijke combinatie van transducent en vertragingsmedium is een rekenkundige reeks van frequentiebanden bij de oneven harmonischen van de kristalresonantiefrequentie, waarbij iedere band een breedte heeft van meer dan 50% van de grondfrequentie van de draaggolf, zodat voor een bandbreedte van 10 MHz een centrale frequentie van ongeveer 20 MHz nodig is. Sinds kort worden piëzo-elektrische keramische materialen als loodzirkonaat-titanaat (de Philips PXE-materialen) in toenemende mate toegepast voor transducenten voor vertragingslijnen [9] [10] bij frequenties tot 10 of

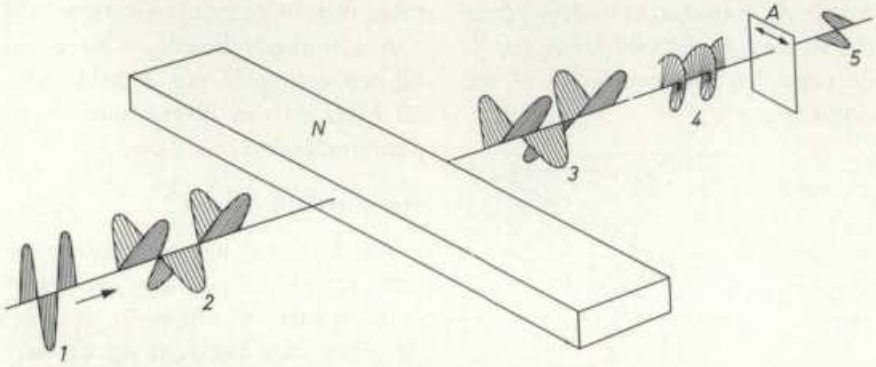


Fig. 8. De detectie van dubbele breking. Vlak gepolariseerd licht bij *1* kan worden ontbonden in twee onderling loodrechte componenten, zie *2*. Na doorgang door het dubbelbrekende materiaal *N* is bij *3* de ene component ten opzichte van de andere in faze achter. Combinatie van deze twee componenten geeft elliptische polarisatie, zie *4*. Doorgang door een analysator *A* levert vlak gepolariseerd licht, zie *5*, waarvan de intensiteit afhangt van de dubbele breking.

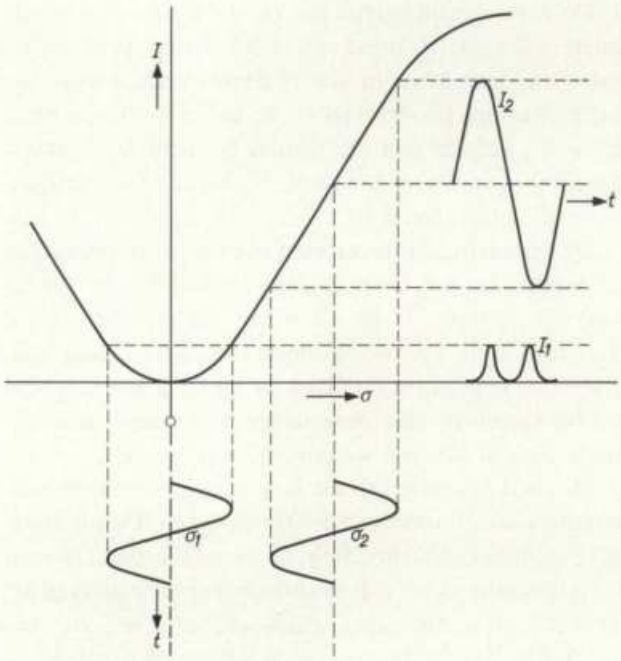


Fig. 9. De lichtintensiteit I die het dubbelbrekend medium doorlaat als functie van de mechanische spanning σ. Een wisselende spanning σ_1 geeft bij onderling loodrechte stand van de assen van polarisator en analysator en bij afwezigheid van een kwartgolflengteplaat een uitgangsintensiteit I_1 van dubbele frequentie. Toevoeging van een kwartgolflengteplaat verplaatst het werkpunt naar het buigpunt van de karakteristiek, hetgeen een lineair verband geeft tussen de spanning (σ_2) en de intensiteitsmodulatie (I_2).

15 MHz. Het voordeel van deze materialen is gelegen in de zeer grote piëzo-elektrische koppelingscoëfficiënt k, die voor kristallijn kwarts ca. 0,14 bedraagt en voor PXE3 ca. 0,7. Daar het opgewekte ultrasone vermogen evenredig is met k^2, is dit een zeer belangrijke verbetering, hoewel de zeer grote diëlektrische constante van dit materiaal (ca. 1500 tegen 4,5 voor kwarts) in dit geval hinderlijk is, wegens de zeer grote capaciteit van de transducent die er het gevolg van is.

Bij grondfrequenties boven 15 MHz wordt de korrelgrootte in het PXE-materiaal van de orde van de dikte, zodat dit materiaal onbruikbaar wordt. Een nieuw keramisch materiaal, kalium-natrium-niobaat, bezit echter een veel fijnere korrel, ten dele als gevolg van de sintertechniek die bij de vervaardiging ervan gebruikt wordt. Het heeft ook een aanzienlijk kleinere diëlektrische constante, ca. 450, en een koppelingscoëfficiënt van ca. 0,6 [11].

Mogelijk zal ook een onlangs onderzocht monokristallijn ferro-elektricum, lithiumniobaat — waarvan

[7] M. Born en E. Wolfe, Principles of optics, Pergamon Press, Londen 1959.
[8] C. F. Brockelsby, J. S. Palfreeman en R. W. Gibson, Ultrasonic delay lines, Iliffe, Londen 1963.
[9] R. W. Gibson, Solid ultrasonic delay lines, Ultrasonics **3**, 49-61, 1965.
[10] C. M. van der Burgt, Transducer materials and isopaustic glasses for delay lines (wordt gepubliceerd in Ultrasonics, 1967).
[11] Bij transducenten van dit materiaal is een resonantiefrequentie bereikt van 75 MHz.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

in het Mullard-laboratorium met succes grote kristallen gekweekt zijn — , nuttig blijken als piëzo-elektrische transducent. De koppelingscoëfficiënt van dit materiaal bedraagt ca. 0,54, de diëlektrische constante ca. 80. Het goed bevestigen van dit materiaal aan het kwartsglas van de vertragingslijn vormt nog een probleem.

Bij gebruik van deze materialen met grote diëlektrische constante kan de capaciteit van de transducent wel 10 000 pF zijn; om deze te verkleinen en aldus de impedantie van de transducent te vergroten tot een geschikte waarde, wordt de transducent onderverdeeld en worden de secties in serie geschakeld als in *fig. 10*. Hierdoor wordt de capaciteit met een factor r^2 verkleind, als r het aantal secties is.

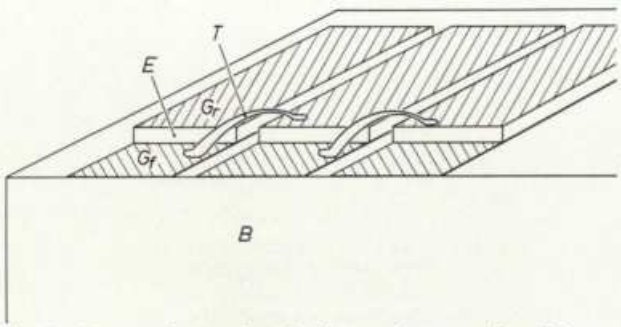


Fig. 10. De transducent E op het kwartsglazen medium B is onderverdeeld in een aantal secties ter vermindering van de capaciteit van de transducent. De elektrodes aan de voorkant (G_f) zijn met die aan de achterkant (G_r) verbonden door bruggen T.

De ultrasone golflengte en de dwarsafmetingen

Het akoestische golffront in de Fresnel-zone („near field") is vlak[8], en hier vindt geen bundelspreiding van betekenis plaats. Voor een frequentie van ca. 20 MHz en een doorsnede van de transducent van 1 cm is de Fresnel-zone ca. 7 cm lang. Buiten deze zone (in het „far field") neemt het golffront geleidelijk een bolvorm aan.

Om een te grote bundelspreiding buiten de Fresnelzone te vermijden — die in een dunne staaf aanleiding zou geven tot golffrontfouten ten gevolge van reflexie door de zijwanden, en in een dikke staaf tot een te grote golffrontkromming en verlies aan geluidsintensiteit —, is het gewenst de transducent vele golflengten breed te maken. Gewoonlijk wordt een minimumdoorsnede van 50 golflengten gekozen (d.i. in kwartsglas bij een frequentie van 20 MHz ca. 9 mm).

Rendement van de lichtmodulatie

Voor een constante modulatiediepte moet het produkt van de spanning en van de breedte van de akoestische bundel constant zijn. Door optische overwegingen wordt aan de bundelbreedte een grens gesteld, daar een lichtstraal, om ten volle tot het effect bij te dragen, tussen twee aangrenzende akoestische golffronten moet liggen. Voor een schuine straal die twee of meer golffronten snijdt, valt de modulatie gedeeltelijk weg. doordat hij gebieden van positieve en negatieve dubbelbreking passeert. Voor een gegeven divergentie φ van de lichtbundel en een gegeven golflengte λ_s van het geluid is de maximale breedte van de akoestische bundel derhalve beperkt tot λ_s/φ.

In het algemeen kan φ slechts worden verkleind ten koste van de lichtflux. Ook de eisen betreffende de signaal-ruisverhouding van de hele opstelling en de maximale intensiteit van de beschikbare lichtbronnen moet men in de beschouwing betrekken.

Een normale breedte voor de akoestische bundel bij een draaggolf van 20 MHz, een bandbreedte van 10 MHz en een divergentie van de lichtbundel van 5 milliradialen is ca. 2 cm.

Het correlatiesysteem

Fig. 11 toont het correlatiesysteem. Een lichtbron (een hogedrukkwiklamp van 1 kW) wordt door de condensorlens L afgebeeld op een spleet. De spiegel M_1 collimeert het licht op de foto-elastische vertragingslijnen D_1 en D_2. De polarisator P polariseert het licht — in het geval van transversale golven — in de richting van de staaf of loodrecht daarop en de analysators A_1 en A_2 staan evenwijdig met of loodrecht op deze richting. De eerste analysator vormt de polarisator voor het tweede systeem.

De kwart-golflengteplaten Q_1 en Q_2 moeten op de juiste wijze georiënteerd zijn en tussen de juiste analysator en polarisator in staan; de volgorde waarin het licht de kwartsglazen staaf en de kwart-golflengteplaat passeert, doet er niet toe. Nadat het licht het systeem gepasseerd is, wordt het door M_2 op een fotomultiplicator geconcentreerd.

De vertragingslijnen moeten tweemaal zo lang zijn als de lengte die het te correleren signaal op de vertragingslijn beslaat. Is de duur van het signaal 100 μs, dan moeten de vertragingslijnen dus 200 μs lang zijn, wat voor transversale golven in kwartsglas ca. 73 cm is. Bij systemen van deze lengte zijn lenzen onpraktisch; ze zijn daarom vervangen door spiegels.

Met een systeem van dit type kan men een impulscompressieverhouding van 1000 bereiken. De uiteindelijke signaal-ruisverhouding na correlatie bereikt voor ruisvrije radar-echo's, de praktische beperkingen van het systeem in aanmerking genomen, een waarde van ca. 50 dB. De verbetering van de signaal-ruisverhouding voor zwakke signalen beneden ruisniveau die correspondeert met een impulscompressie van 1000 : 1, is 30 dB.

De omkering van een impuls in de tijd

Voor dit systeem is het, zoals gezegd, nodig één signaal in de tijd om te keren. Hiervoor verdient het uit-

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

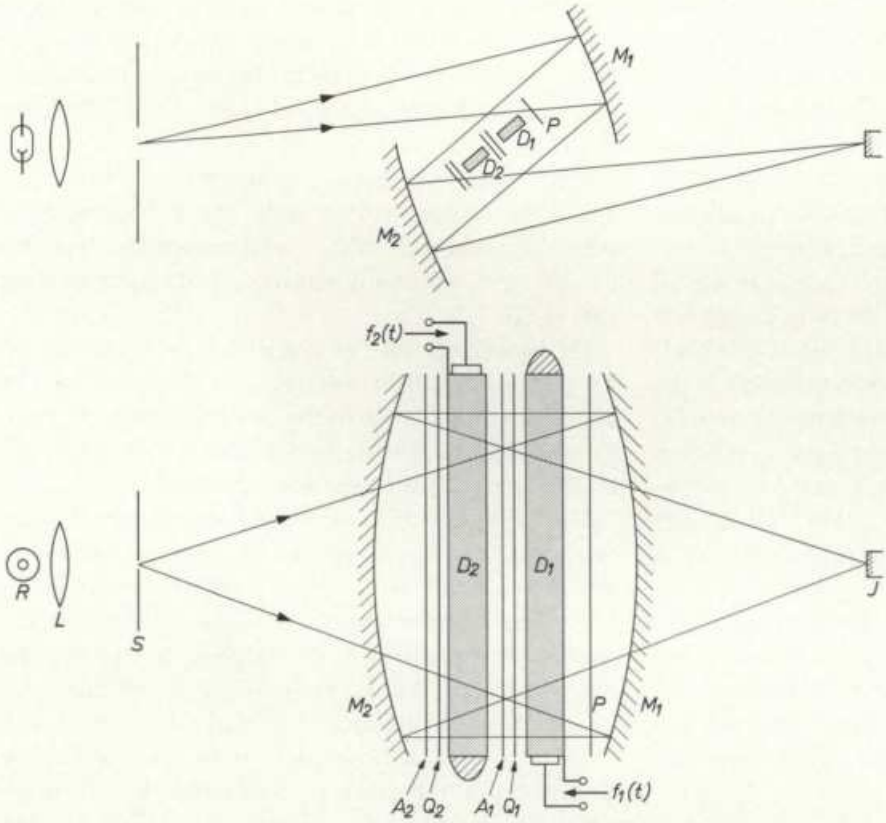


Fig. 11. De correlator met twee vertragingslijnen, in boven- en in zijaanzicht. De lichtbron R wordt door de condensorlens L afgebeeld op de spleet S. Het licht wordt door de spiegel M_1 gecollimeerd op de foto-elastische vertragingslijnen D_1 en D_2. Het licht passeert achtereenvolgens de polarisator P, de foto-elastische staaf D_1, de kwartgolflengteplaat Q_1, de analysator A_1, de tweede foto-elastische staaf D_2, de kwartgolflengteplaat Q_2 en de analysator A_2. Ten slotte wordt het licht door de spiegel M_2 geconcentreerd op de fotodetector J.

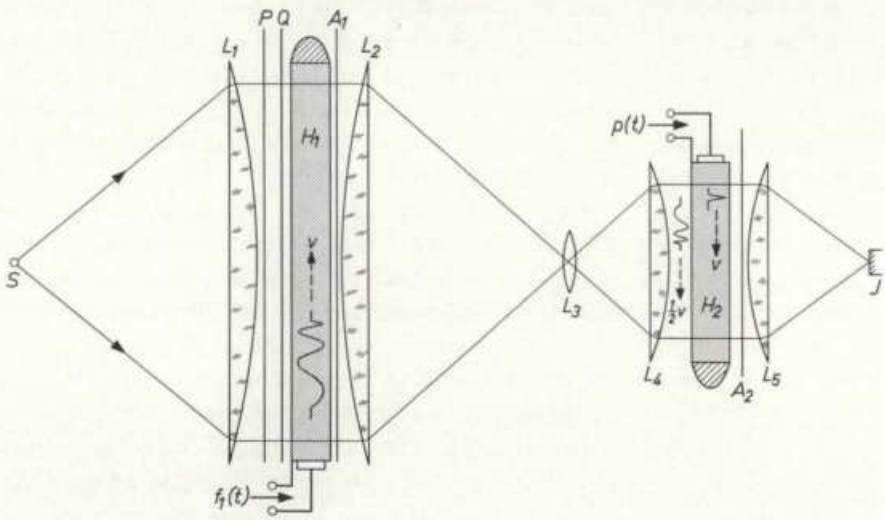


Fig. 12. Een optisch systeem voor omkering van een signaal in de tijd. Licht van de spleet S wordt gecollimeerd op de eerste akoestische vertragingslijn H_1. Hierin loopt het om te keren signaal $f_1(t)$ met de geluidssnelheid v. Met behulp van de polarisator P, de kwartgolflengteplaat Q en de analysator A_1 wordt het licht met deze functie gemoduleerd. Lens L_2 werpt dit gemoduleerde licht op lens L_3, die een $2\times$ verkleind beeld van H_1 vormt op de tweede vertragingslijn H_2. De lens L_4 collimeert het licht op deze lijn. Het licht dat op H_2 valt, draagt een $2\times$ verkleind beeld van de functie $f_1(t)$ dat zich dus met een snelheid $v/2$ verplaatst. Een korte impuls $p(t)$ verplaatst zich met de snelheid v langs H_2. Deze impuls haalt het optische patroon in en „tast" dit „af" gedurende een tijd die precies gelijk is aan de duur van de oorspronkelijke impuls. De analysator A_2 detecteert het doorgelaten signaal en het licht wordt door de lens L_5 op de fotodetector J geconcentreerd.

gezonden signaal de voorkeur, daar de amplitude ervan minder variabel is dan die van de echo, waarvan de amplitude wel 60 dB kan variëren.

Voor het omkeren moet het signaal gedurende een tijd gelijk aan zijn duur worden opgeslagen. Voor het omkeerproces zijn twee methodes voorgesteld. Bij de ene wordt weer gebruik gemaakt van een opto-akoestisch systeem, bij de andere van een geheugenbuis.

Fig. 12 illustreert het eerste systeem. Voor de optiek zijn lenzen gebruikt, hoewel spiegels even goed voldoen. Het om te keren signaal wordt toegevoerd aan een foto-elastische staaf, die de intensiteit van opvallend licht weer lineair moduleert. De intensiteitsverdeling van het doorgelaten licht is een kopie van het spanningspatroon in de staaf, en dit lichtpatroon verplaatst zich met de geluidssnelheid langs de staaf.

Het optische systeem vormt een verkleind, omgekeerd beeld van het lichtpatroon op een tweede foto-elastische staaf. De verkleining is precies 2 : 1, zodat het optische beeld de halve lengte van het oorspronkelijke patroon beslaat en zich verplaatst met de halve geluidssnelheid. Het werkpunt van de tweede staaf is de oorsprong van de karakteristiek (zie fig. 9; in spanningsloze toestand wordt geen licht doorgelaten). Er wordt één spanningsimpuls aan toegevoerd, waarvan de totale tijdsduur kort is in vergelijking met het omgekeerde

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

van de bandbreedte van het om te keren signaal. Deze enkele spanningsimpuls, die zich weer met de geluidssnelheid verplaatst, „tast" het bewegende lichtpatroon „af" in een tijd die precies gelijk is aan de oorspronkelijke impulsduur. De resulterende intensiteit van het licht dat door deze tweede foto-elastische lijn wordt doorgelaten, is een in de tijd omgekeerde kopie van het oorspronkelijke ingangssignaal.

Bij het tweede systeem wordt het uitgezonden signaal opgetekend in een geheugenbuis [12], en in de tijd omgekeerd door het achterstevoren uit te lezen. Ten einde een groot gedeelte van het geheugenoppervlak te gebruiken en aldus de signaal-ruisverhouding van het systeem te verbeteren, kan men het signaal langs een spiraal om b.v. het buitenste derde deel van het geheugenscherm schrijven. Om een groter deel van het oppervlak te gebruiken, kan men de schrijf- en leesvlek in radiale richting defocusseren door deflexie met behulp van een roterende quadrupoolmagneet (een middel om radiaal astigmatisme op te wekken).

Het laatste systeem blijkt in staat de gewenste signaal-ruisverhouding en het gewenste scheidend vermogen te leveren. Het zal waarschijnlijk de voorkeur krijgen boven het eerste.

Vergroting van de dracht

Het beschreven systeem zal slechts correleren gedurende een tijd die gegeven wordt door het verschil tussen de lengte van de foto-elastische staaf en de lengte van de impuls. Voor een impulslengte van 100 μs en een staaflengte van 200 μs zal de correlatietijd dus 100 μs bedragen. In het ideale geval vertraagt men het ingangssignaal met de duur van een impuls vóórdat het de vertragingslijn ingaat.

Men kan een tweede correlator inschakelen voor de resterende 100 μs, ten einde een correlatie gedurende de volle 200 μs te krijgen.

Om de dracht nog verder te vergroten, kan men het uitgezonden omgekeerde signaal meerdere malen van de geheugenbuis aflezen tot de gewenste afstand is bestreken, waarna het wordt uitgewist. De hiervoor gebruikte tijd moet natuurlijk korter zijn dan de herhalingsperiode van de radar.

Beperkingen van het systeem

De beperkingen van het systeem zijn voornamelijk aan twee oorzaken te wijten: de praktische beperkingen van het akoestische systeem en de beperkingen ten gevolge van het quantumkarakter van het licht.

Om praktische redenen kan men de foto-elastische vertragingslijn niet langer dan ca. 75 cm maken, hetgeen voor transversale golven in kwartsglas correspondeert met 200 μs, zodat impulsen van ca. 100 μs gecorreleerd kunnen worden. Door de akoestische verliezen in een dergelijke lijn kan men met de frequentie niet hoger gaan dan tot ca. 60 MHz, tenzij men kwarts met zeer weinig verliezen heeft en de lijn bij verhoogde temperatuur laat werken; in dat geval is 80 of zelfs 100 MHz mogelijk.

Heeft men een akoestische bandbreedte van 50%, dan is bij de genoemde waarde van 60 MHz een impulscompressie van 3000 : 1 mogelijk, wat correspondeert met een verbetering van de signaal-ruisverhouding van 35 dB.

De beperking van het systeem door het quantumkarakter van het licht volgt uit een beschouwing van de totale nuttige lichtstroom die de lichtbron uitzendt, de gevoeligheid van de fotodetector en de maximale hoeveelheid licht die deze kan detecteren.

Daar het scheidend vermogen van de fotodetector tweemaal de ultrasone draaggolffrequentie moet bedragen, moet deze detector rondom 60 MHz een aanvaardbare frequentiekarakteristiek hebben. Door dit feit en door de vereiste grote gevoeligheid en lage ruis ziet het er naar uit dat op dit ogenblik alleen een fotomultiplicator als detector in aanmerking komt.

De totale nuttige lichtstroom en de gevoeligheid van de fotodetector bepalen de ondergrens voor een gedetecteerd signaal. De bovengrens wordt bepaald door de totale nuttige lichtstroom te zamen met de maximale hoeveelheid licht die de fotodector kan detecteren.

Fotokatodes kunnen gewoonlijk hoogstens een fotostroom van ca. 1 μA/cm² leveren; dit komt bij de maximale frequentie $2(f_0 + \Delta f)$ van 60 MHz overeen met 10^5 elektronen per periode van de draaggolf, hetgeen leidt tot een ruisgetal van ca. 50 dB. Stelt men het minimaal detecteerbare signaal van de apparatuur in op een signaal-ruisniveau van 0 dB, dan omvat het bestreken gebied de volle 50 dB.

Heeft de apparatuur een impulscompressie van 1000 : 1 (b.v. een bandbreedte van 10 MHz en een impulsduur van 100 μs), dan is er aan de ingang een signaal-ruisverhouding van —30 dB nodig om de maximale gevoeligheid van 0 dB bij de uitgang te verkrijgen; verzadiging begint dan op te treden bij ingangssignalen van 20 dB boven het ruisniveau.

De lichtbron voor de apparatuur is een hogedrukkwiklamp van 1 kW; het licht wordt zo gefilterd dat alleen de spectrumlijnen van 0,405 μm en 0,436 μm worden doorgelaten. In vele opzichten zou een gaslaser geschikter zijn als lichtbron. Een gaslaser waarvan de straling een flinke intensiteit heeft bij die golflengte waarbij de fotokatode het gevoeligst is, zou op het ogenblik echter zeer duur zijn. Bovendien levert de kwiklamp een bevredigende prestatie.

[12] M. Knoll en B. Kazon, Storage tubes, Wiley, New York 1952.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Een verbetering van betekenis zou misschien kunnen worden verkregen door het licht te detecteren met een halfgeleiderdetector; deze heeft een veel hoger quantumrendement dan een fotokatode. Door de in de halfgeleider zelf gegenereerde ruis en het ontbreken van een geschikt inwendig versterkingsproces levert dit echter vooralsnog geen voordeel.

Slotopmerkingen

Het beschreven correlatiesysteem heeft een groot voordeel boven andere impulscompressiesystemen: er is geen nauwkeurige impulscompressie en -expansie nodig en het uitgezonden signaal van de radar hoeft geen nauwkeurig voorgeschreven verloop te hebben.

Lukt het om sommige onderdelen, b.v. de lichtbron en de fotodetector, te verbeteren, en heeft het huidige ontwikkelingswerk aan ultrasone transducenten succes, dan zou men een aantrekkelijk toestel kunnen maken. De belangrijkste beperking ervan zal dan gelegen zijn in de omvang van de apparatuur, waardoor toepassing slechts daar mogelijk zal zijn waar men niet met de ruimte hoeft te woekeren.

Samenvatting. Correlatiedetectie is reeds lang bekend als een ideaal middel om een gereflecteerd radarsignaal van ruis te onderscheiden. Bij de correlatiedetectie kan een lang signaal van grote bandbreedte in de tijd gecomprimeerd worden. De tot dusver gemaakte detectors van dit type waren zeer ingewikkeld. Het voorgestelde systeem is, ondanks zijn omvang ten gevolge van grote optische onderdelen, in wezen eenvoudig. Het uitgezonden en het ontvangen signaal worden elk aan een foto-elastische vertragingslijn toegevoerd. Voor de correlatie moeten ogenblikswaarden van de twee signalen met elkaar worden vermenigvuldigd. Het produkt wordt gevormd door de modulatie van licht dat achtereenvolgens de twee vertragingslijnen passeert. Bij dit systeem moet een der signalen in de tijd worden omgekeerd; enkele methodes om dit te realiseren worden beschreven. Het is mogelijk een bandbreedte van 10 MHz en correlatietijden van ca. 100 µs te verkrijgen, hetgeen leidt tot een verbetering van de signaal-ruisverhouding van 30 dB en een impulscompressieverhouding van 1000 : 1.

Een digitale richtingzoeker

R. N. Alcock

Inleiding

Sedert enkele jaren worden bij het peilen met radiogolven interferometertechnieken toegepast. De richting van een radiozender kan nl. worden bepaald door het signaal op te vangen op twee punten die op een bekende afstand van elkaar liggen, en dan de fazen van de ontvangen signalen te vergelijken. Een dergelijke interferometer zal, afhankelijk van de afstand tussen de twee ontvangpunten, een nauwkeurige indicatie van de richting geven in een klein gezichtsveld, of een onnauwkeurige indicatie in een groot gezichtsveld. Het nieuwe interferometersysteem dat hier zal worden beschreven, werkt met microgolven en geeft een *nauwkeurige* indicatie van de richting in een *groot* gezichtsveld. Het levert de uitkomsten in digitale vorm. Een en ander is bereikt door op meer dan twee punten signalen op te vangen en door digitale verwerkingstechnieken toe te passen.

Er zijn voor het systeem diverse toepassingsmogelijkheden. Het kan b.v. in vliegtuigen en helikopters worden geplaatst als hulpmiddel bij het blindlanden. De plaats van grondbakens die impulsvormige microgolfsignalen uitzenden, kan dan nauwkeurig in digitale vorm worden bepaald en met deze informatie kan een perspectivisch beeld worden verkregen van de bebakening van het terrein. Het systeem kan ook aan het eind van een landingsbaan worden opgesteld om het signaal van de wolkenradarapparatuur van een vliegtuig te ontvangen, en aldus het binnenvliegen te volgen. De gegevens kunnen naar het vliegtuig worden gezonden of gebruikt worden voor andere hulpmiddelen bij de landing.

Het systeem kan ook worden gebruikt bij de navigatie van schepen op rivieren en riviermonden. De positie van een schip wordt dan nauwkeurig bepaald door peilingen op de scheepsradar (of een speciaal baken op het schip) vanaf twee stations aan de wal, of vanaf één station in combinatie met secundaire radar.

R. N. Alcock, M.A., M.Sc., medewerker van Mullard Research Laboratories, Redhill (Surrey), Engeland.

Het principe van de werking

Fig. 1 toont een interferometer die bestaat uit twee antennes A_1 en A_2 op onderlinge afstand d geplaatst; de signalen van deze antennes worden toegevoerd aan een fazediscriminator D. Een van de zender afkomstige

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

vlakke golf $W_1 - W_2$ maakt een hoek Θ met de verbindingslijn der antennes. Het gemeten fazeverschil wordt dan gegeven door:

$$\varphi = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \Theta.$$

Fig. 2 laat zien hoe voor twee interferometers met antenneafstanden resp. d en $4d$ het gemeten fazeverschil verandert met de peilingshoek Θ. Ter vereenvoudiging is aangenomen dat Θ klein is, zodat $\varphi = 2\pi d\Theta/\lambda$. We zien dat het gemeten fazeverschil bij de grote interferometer vier keer zo snel verandert met de peilingshoek als bij de kleine interferometer. Waar bij de fazemeting een zekere fout optreedt, geeft de grote interferometer dus een nauwkeuriger uitkomst. Veelvouden van 2π kan de discriminator echter niet onderscheiden, zodat signalen bij vier verschillende peilingshoeken hetzelfde fazeverschil opleveren. De grote interferometer geeft dus een dubbelzinnige meting als hij wordt gebruikt in hetzelfde gezichtsveld als de kleine

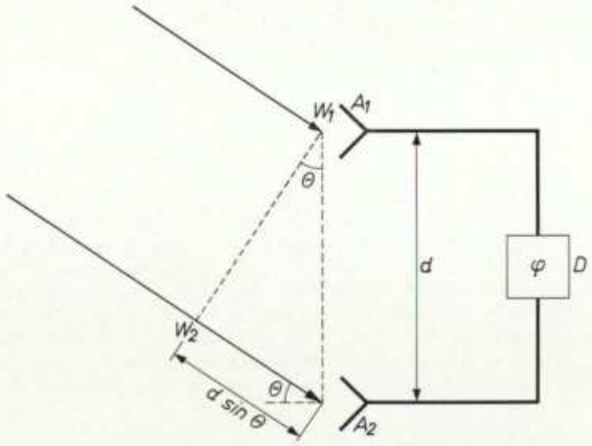


Fig. 1. Richtingsmeting (peiling) met een interferometer. Een vlakke golf $W_1 - W_2$ wordt opgevangen door twee antennes A_1 en A_2 met onderlinge afstand d. De antennes leveren signalen aan een fazediscriminator D. Het gemeten fazeverschil φ is afhankelijk van de richting van de invallende golf, de peilingshoek Θ.

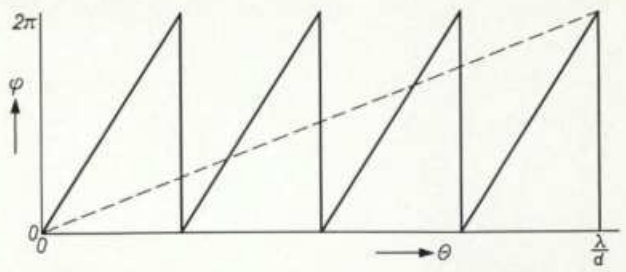


Fig. 2. Het verband tussen het fazeverschil φ en de peilingshoek Θ voor een interferometer met antenneafstand d (gestreepte lijn) en voor een interferometer met antenneafstand $4d$ (getrokken lijn). Het fazeverschil verandert bij de grote interferometer vier maal zo snel, maar springt steeds terug van 2π naar 0, zodat de meting in het gebied $0 < \Theta < \lambda/d$ dubbelzinnig is.

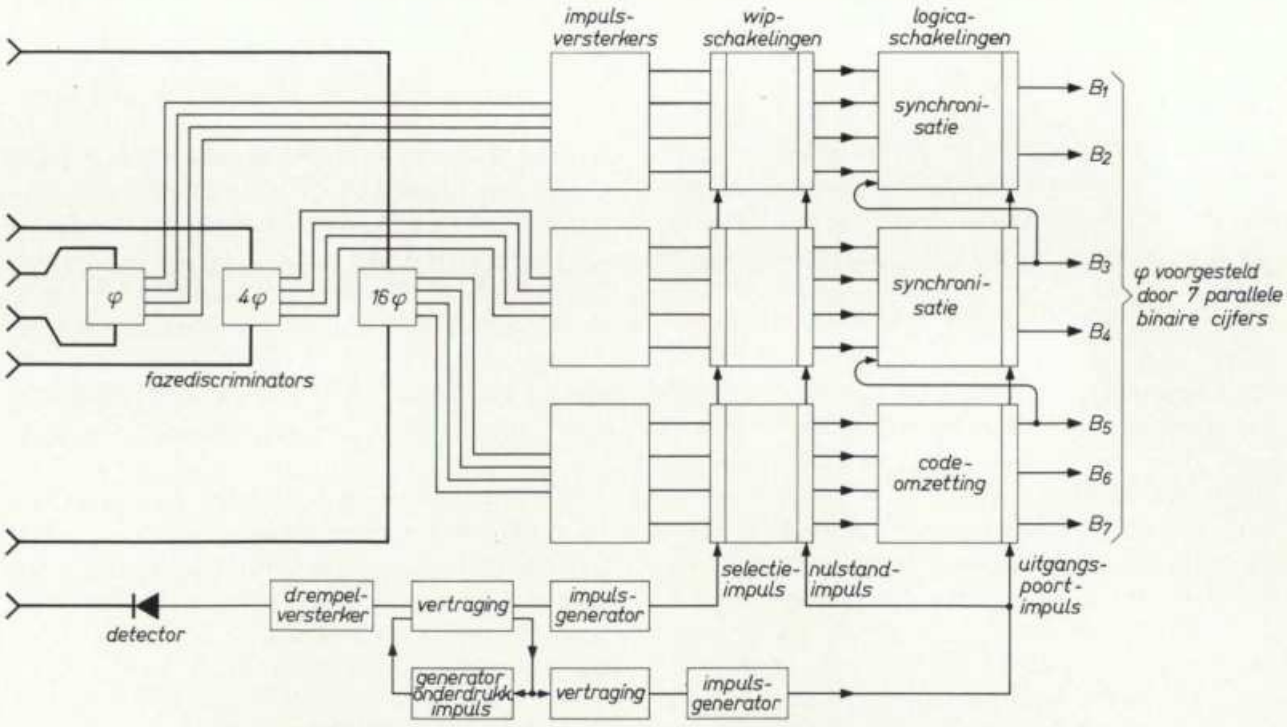


Fig. 3. Blokschema van digitale richtingzoeker. Drie interferometers waarvan de antenneafstanden zich verhouden als 1 : 4 : 16, ontvangen impulsvormige signalen. De uitgangsimpulsen van de drie fazediscriminators geven in digitale vorm het fazeverschil weer. Via impulsversterkers worden deze impulsen parallel doorgegeven naar wipschakelingen, en vandaar naar een logicaschakeling. Aan de uitgangen van deze schakeling verschijnt het fazeverschil φ in een binaire codering; deze φ is een maat voor de peilingshoek Θ.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

interferometer ($0 \leqq \Theta \leqq \lambda/d$). Het is duidelijk dat men door twee interferometers te gebruiken en de gemeten fazeverschillen op een geschikte wijze te verwerken, de dubbelzinnigheid die is veroorzaakt door de grote interferometer, kan opheffen door te refereren aan de kleine interferometer, zodat de nauwkeurige meting zich over een groter gezichtsveld kan uitstrekken.

Dit principe is in het systeem dat hier zal worden besproken, uitgebreid tot drie interferometers (*fig. 3*). Deze interferometers, met waarden voor de afstand d die zich verhouden als 1 : 4 : 16, leveren drie fazemetingen, waarvan de resultaten direct in digitale vorm worden gebracht, daarna worden versterkt en vervolgens bewerkt door een logicaschakeling die uit de verkregen getallen in een binaire code een maat voor de peilingshoek bepaalt. De nauwkeurigheid is gelijk aan die van de grootste interferometer en het gezichtsveld wordt bepaald door de kleinste. We zullen het systeem nu meer in detail behandelen.

van de T-stukken M en N zijn kwadratische detectors aangesloten; de signalen aan deze uitgangen zijn een maat voor de vectorsom en het vectorverschil van de ingangssignalen van het T-stuk. De impulsvormige uitgangssignalen A', B', C' en D' worden van elkaar afgetrokken, waardoor men de uitgangssignalen A, B, C en D verkrijgt, die evenredig zijn met $\sin\varphi$, $\sin(\varphi + \pi/4)$, $\cos\varphi$ en $\cos(\varphi + \pi/4)$.

Fig. 5a toont hoe de vier uitgangssignalen variëren met het fazeverschil φ in het gebied $0 \leqq \varphi \leqq 2\pi$. We zien dat de vier amplitudes nul zijn bij waarden van φ die een veelvoud zijn van $\pi/4$. De polariteiten van de vier signalen vormen een digitale code waarmee het fazeverschil wordt ingedeeld in één van acht intervallen

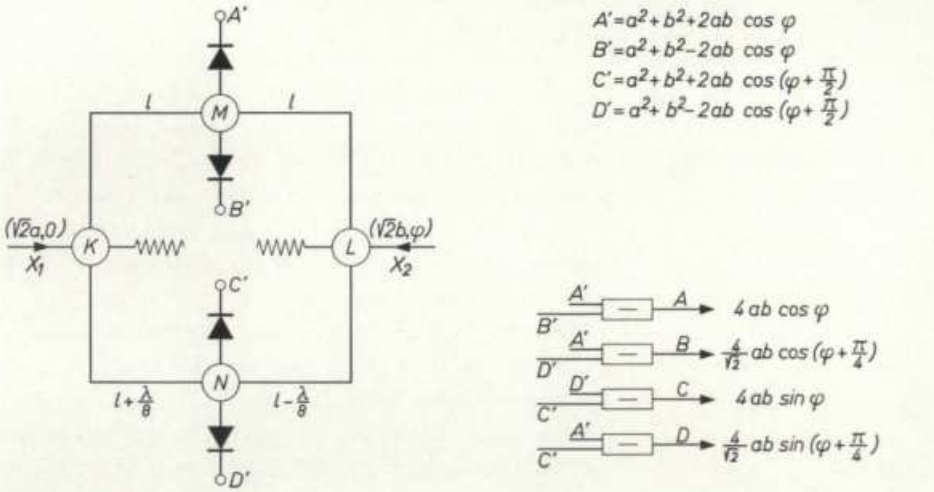


Fig. 4. Schema van de fazediscriminator. Twee microgolfsignalen X_1 en X_2 worden toegevoerd aan twee aangepaste T-stukken K en L, waar ze gelijkelijk worden verdeeld over twee leidingen. In de aangepaste T-stukken M en N worden de fazeverschillen bepaald; de signalen A', B', C' en D' worden verkregen met kwadratische detectors. Door aftrekken ontstaan uit deze signalen de gevraagde signalen A, B, C en D.

De digitale fazemeting

De ontvanger werkt bij omstreeks 9,5 GHz over een bandbreedte van 700 MHz. Drie paren microgolfantennes in de vorm van hoorns voeden drie discriminators, waarvan er in *fig. 4* één is weergegeven.

Elk impulsvormig microgolfsignaal wordt door de aangepaste hybridische T-stukken (magic hybrid tee junctions) K en L verdeeld over twee leidingen. De signalen komen weer samen in de aangepaste hybridische T-stukken M en N, waar het fazeverschil wordt bepaald; als gevolg van het lengteverschil der toevoerleidingen vertonen deze fazeverschillen onderling een verschil van $\pi/2$. Hoewel dit verschil afhankelijk is van de frequentie, varieert het over de bandbreedte van de ontvanger nauwelijks. Op de vrije uitgangen van elk

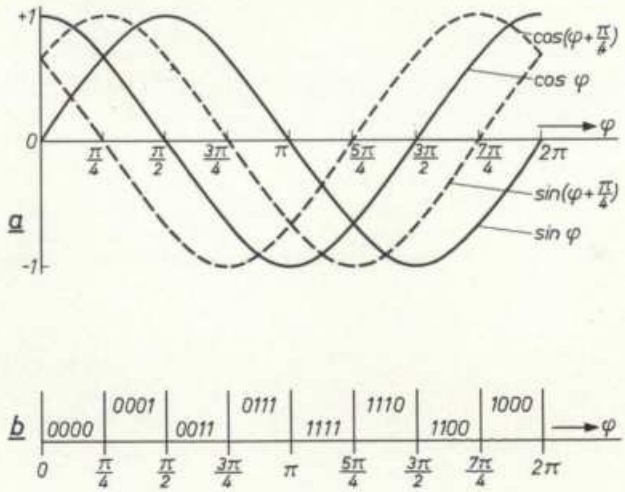


Fig. 5. Het digitaliseren van de faze. *a*) De uitgangssignalen als functie van de faze. De polariteiten van de vier signalen vormen een digitale code waarmee de faze wordt ingedeeld in een van acht intervallen ter grootte $\pi/8$. *b*) De intervallen met hun codering. De polariteiten van $\sin\varphi$, $\sin(\varphi + \pi/4)$, $\cos\varphi$ en $\cos(\varphi + \pi/4)$ vormen de code, waarbij positieve amplitudes worden aangeduid met „0" en negatieve met „1". In het gebied $\pi < \varphi < 5\pi/4$ b.v. zijn alle amplitudes negatief en is de code 1111.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

ter grootte van $\pi/4$. De codering van de intervallen, die is gegeven in fig. 5*b*, is verkregen door een positieve amplitude aan te duiden met een „0" en een negatieve met een „1". De signalen worden vervolgens versterkt, waarbij het alleen aankomt op de polariteit van de impulsen; de versterkers mogen dus in hun verzadigingsgebied werken en behoeven niet bijzonder goed lineair te zijn of een zeer constante versterking te hebben. De negatieve impulsen van de versterkers besturen bistabiele wipschakelingen waardoor de digitale code wordt vastgelegd in spanningen met standaardniveaus. De vier „cijfers" worden parallel (gelijktijdig) doorgegeven aan de logicaschakeling, te zamen met twee stellen cijfers van de andere discriminators, die betrekking hebben op 4φ en 16φ.

De logica

Stel dat elk van de fazen φ, 4φ en 16φ verdeeld is in vier intervallen groot $\pi/2$, die zijn aangeduid met de binaire codering 00, 01, 10, 11. De drie fazen worden in dat geval weergegeven door de volgende cijfers:

φ (radialen)	φ	4φ	16φ
0			
	00	00	00
	00	00	01
	00	00	10
	00	00	11
$\pi/8$			
	00	01	00

Als we de cijfers van „4φ" enz. en „16φ" beschouwen, is het duidelijk dat de twee afzonderlijke cijferparen gezamenlijk een binaire code vormen; bovendien vormen de drie cijferparen een 6-bits binaire code waarin de getallen evenredig zijn met φ. Door de keuze van 4 : 1 voor de verhouding van de antenneafstanden bij de interferometers, komt het meetresultaat dus beschikbaar in een vorm die rechtstreeks kan worden omgezet in een binair getal.

Elke discriminator vertoont echter een fout in de fazemeting; deze fouten zijn voor de drie discriminators onafhankelijk van elkaar. Door deze fouten zijn de drie paren cijfers enigszins ten opzichte van elkaar verschoven. In de bovenstaande tabel zal b.v. 4φ bij een iets andere peilingshoek van 00 in 01 overgaan dan waarbij 16φ van 11 in 00 overgaat; hierdoor zal een fout ontstaan. Om een foutloos binair uitgangssignaal te krijgen, moeten de veranderingen van de cijfers in de φ- en in de 4φ-code worden gesynchroniseerd met die in de 16φ-code.

De logicaschakeling werkt als volgt: de vier cijfers van de 16φ-discriminator worden rechtstreeks omgezet in de drie minst significante binaire cijfers B_5, B_6 en B_7, die als referentiecijfers dienen. *Tabel I* geeft de code van de discriminator naast die van het binaire uitgangssignaal. Aan de hand van deze tabel kan een eenvoudige logicaschakeling worden ontworpen voor de code-omzetting.

Het meest significante van de drie referentiecijfers, B_5, wordt gecombineerd met de vier cijfers van de 4φ-discriminator, waardoor men het volgende paar binaire cijfers B_3 en B_4 verkrijgt, die synchroon zijn met de referentiecijfers. De logicaschakeling voor de synchronisatie is afgeleid uit *tabel II*. Kort gezegd, heeft het referentiecijfer B_5 een viervoudige dubbelzinnigheid als 4φ met een bedrag 2π verandert. Deze dubbelzinnigheid wordt weggenomen door te refereren aan de 4φ-code, die acht verschillende cijfercombinaties geeft, die zijn aangeduid met de binaire cijfers B_3 en B_4

Tabel I. De code-omzetting. Onderstaande discriminatorcode treedt op aan de uitgangen van de discriminator van de grootste interferometer. De gevraagde binaire uitgangsspanningen B_5, B_6 en B_7 zijn in de tabel naast de discriminatorcode geplaatst. Uit deze tabel kan een logicaschakeling voor de code-omzetting worden afgeleid.

	Ingang: discriminatorcode				Uitgang: binaire code		
16φ	$\sin 16\varphi$	$\sin\left(16\varphi+\frac{\pi}{4}\right)$	$\cos 16\varphi$	$\cos\left(16\varphi+\frac{\pi}{4}\right)$	B_5	B_6	B_7
0							
	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	1	0	0	1
	0	0	1	1	0	1	0
	0	1	1	1	0	1	1
π							
	1	1	1	1	1	0	0
	1	1	1	0	1	0	1
	1	1	0	0	1	1	0
	1	0	0	0	1	1	1
2π							

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

(op deze wijze worden de veranderingen in B_3 en B_4 gesynchroniseerd met veranderingen in B_5). Om het synchroniseren te vereenvoudigen, is in een van de voedingsleidingen van de 4φ-discriminator een fazeverschuiving van $\pi/8$ geïntroduceerd (duidelijkheidshalve weggelaten in fig. 3). Streepjes in de 4φ-code geven onzekerheidsgebieden aan op die plaatsen in de code waar een cijfer verandert. In elke discriminator mag een maximale onzekerheid van $\pm 22\frac{1}{2}°$ optreden voordat B_3 en B_4 de verkeerde waarde aannemen. Op

Tabel II. De synchronisering. De in faze verschoven digitale code van de discriminator van de middelste interferometer neemt de dubbelzinnigheid weg van het binaire referentiecijfer B_5. De gevraagde binaire uitgangsspanningen B_3 en B_4 zijn gesynchroniseerd met B_5. De streepjes geven de onzekerheidsgebieden van $\pm 22\frac{1}{2}°$ aan in de discriminatorcode. Uit deze tabel kan een logicaschakeling voor de synchronisering worden afgeleid.

	Ingang					Uitgang	
	discriminatorcode				binaire referentie	gesynchroniseerde binaire code	
4φ	$\sin\left(4\varphi+\frac{\pi}{8}\right)$	$\sin\left(4\varphi+\frac{3\pi}{8}\right)$	$\cos\left(4\varphi+\frac{\pi}{8}\right)$	$\cos\left(4\varphi+\frac{3\pi}{8}\right)$	B_5	B_3	B_4
0							
	—	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	—	1	0	0
	0	0	—	1	0	0	1
	0	—	1	1	1	0	1
π							
	—	1	1	1	0	1	0
	1	1	1	—	1	1	0
	1	1	—	0	0	1	1
	1	—	0	0	1	1	1
2π							

soortgelijke wijze wordt B_3 gecombineerd met de vier cijfers van de φ-code voor het verkrijgen van de twee gesynchroniseerde cijfers B_1 en B_2.

De drempel

Essentieel voor de werking van het systeem is een drempelkanaal ter voorkoming van fouten bij kleine signalen die niet in staat zijn de bistabiele wipschakelingen te doen omslaan (fig. 3). Een aparte hoorn levert een signaal aan een detector en een impulsversterker; impulsen met een geschikte amplitude schakelen een aantal impulsgenerators in. Deze hebben vier functies.
a) De twaalf versterkte impulsen van de discriminators worden geselecteerd en, wanneer zij hun grootste amplitude hebben bereikt, gedurende een korte tijd (50 ns) doorgelaten naar de wipschakelingen. Hiermee is voorkomen dat bij het aftrekken van de uitgangssignalen van de discriminators spanningspieken optreden aan de voor- en de achterzijde van de impulsen.
b) Na de tijdsduur die voor de werking van de logicaschakeling nodig is, worden in de zeven uitgangen van deze schakeling poorten geopend.
c) Als de uitgangsimpulspoort sluit, worden de wipschakelingen weer in hun nulstand gezet.
d) De selectie-impuls wordt na een meting gedurende enkele microseconden onderdrukt, om er zeker van te zijn dat steeds slechts één signaal wordt verwerkt. Dit elimineert ook multipele reflexies.

De verkregen resultaten

De experimentele ontvanger heeft een gevoeligheid van 6 μW en een nauwkeurigheid van 10′ in een gezichtsveld van 20°. De toegelaten onzekerheid van $22\frac{1}{2}°$ in de fazemeting is groot genoeg om fouten te vermijden die zouden ontstaan in de discriminator en door golffrontvervormingen als gevolg van reflexie. Er is een proefapparaat gebouwd met twee loodrecht op elkaar staande interferometersystemen, die azimut en elevatie meten, voor gebruik bij blindlanden (*fig. 6*). De antenneafstand van de grootste interferometer is 132 cm, en de rest van het apparaat, met inbegrip van de hoorns, is ondergebracht in een cilinder met een diameter van 46 cm en een lengte van 77 cm. Naar verwachting zal een compleet apparaat dat werkt bij 15 GHz met een nauwkeurigheid van 20′, niet groter zijn dan $35\times35\times12$ cm.

Een grotere nauwkeurigheid of een groter gezichtsveld kan worden verkregen door het aantal interferometers van het systeem te vergroten, waarbij de verhouding 4 : 1 voor de antenneafstanden blijft gehandhaafd. Door deze verhouding te verkleinen tot 2 : 1 en de logicaschakeling te wijzigen, kan men de toegelaten onzekerheid in de faze verhogen tot $\pm 67\frac{1}{2}°$. Dit kan van belang zijn als de voortplanting van de radar-

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

golven wordt verstoord door een ongunstige gesteldheid van het terrein. Het beschreven systeem is een bijzonder geval van de systemen waarbij de afstandsverhouding een willekeurig geheel getal of een willekeurige breuk mag zijn. Wanneer deze verhouding geschreven kan worden in de vorm 2^K, waarin K een geheel getal is, hebben de logicaschakeling en de binaire uitgangscode een eenvoudige vorm [1]. De gevoeligheid van het systeem zou misschien nog verhoogd kunnen worden door superheterodynetechnieken toe te passen.

[1] R. N. Alcock, P. W. East en S. J. Robinson, A digital method of ambiguity resolution in multiple interferometers, verschijnt binnenkort als verslag.

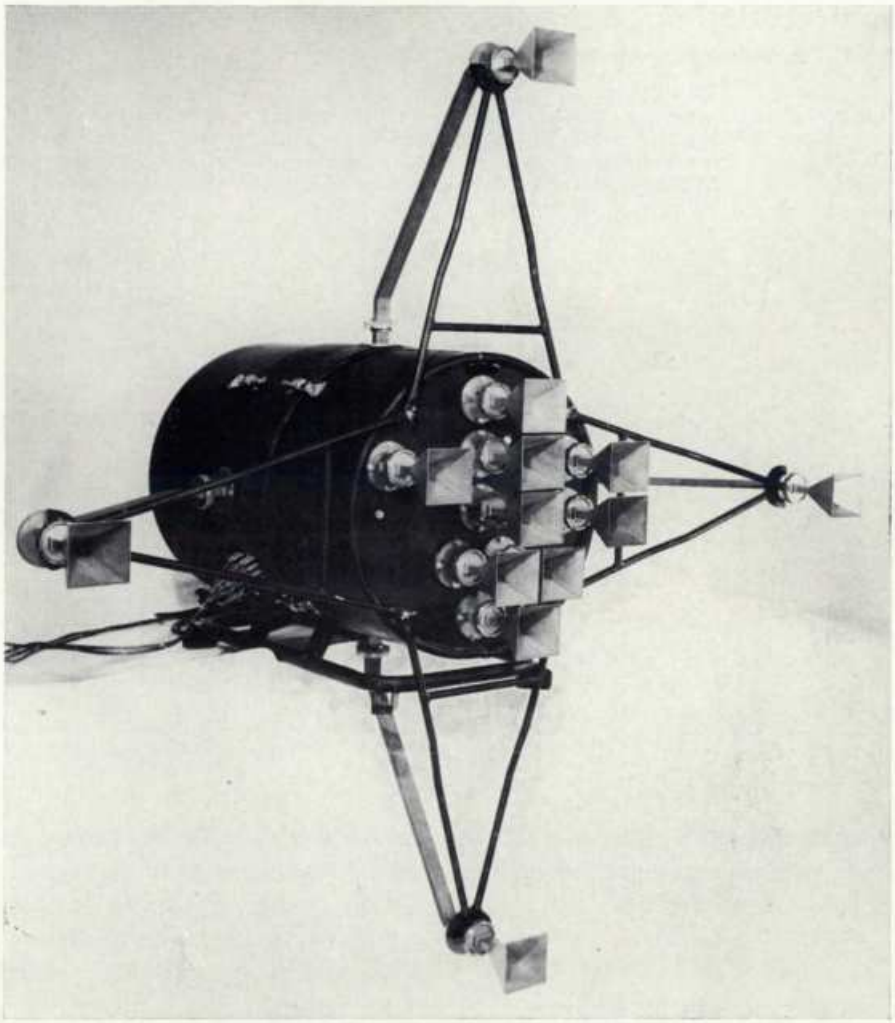


Fig. 6. Experimenteel model van een digitale richtingzoeker. De schakelingen die behoren bij de twee loodrecht op elkaar staande interferometersystemen bevinden zich in de cilindrische doos.

Samenvatting. Beschrijving van een ontvanger met digitaal uitgangssignaal voor het nauwkeurig peilen met microgolven. De ontvanger kan worden toegepast bij het blindlanden van vliegtuigen en in navigatiesystemen voor rivieren en riviermonden. Het peilen van een microgolfzender is in een groot gezichtsveld met grote nauwkeurigheid mogelijk door een aantal interferometers te gebruiken met onderling verschillende antenneafstanden. De dubbelzinnigheid van de peiling met een grote interferometer kan dan worden ondervangen door te vergelijken met een kleine interferometer. Hiervoor wordt een eenvoudige en snelle digitale methode toegepast, waarbij fazeverschillen in digitale vorm worden verkregen en zodanig worden verwerkt dat de richting van het invallende microgolfsignaal in binaire code beschikbaar komt. Met een experimenteel apparaat dat werkt op een impulsvormig signaal van 9,5 GHz en dat drie paren antennes heeft waarvan de afstanden zich verhouden als16 : 4 : 1, is een scheidend vermogen van 10′ bereikt in een gezichtsveld van 20°. Het gezichtsveld en het scheidend vermogen van het toestel kunnen worden vergroot door volgens hetzelfde principe nog meer interferometers te gebruiken.

Jaargang 28, 1967, no. 8/9/10 blz. 229-332 Verschenen 29 september 1967

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!